

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



Cuantificación de las Emisiones de Gases Efecto  
Invernadero producto de Incendios Forestales utilizando  
Métodos Indirectos.

**PRESENTA:**

**ING. KARLA ESTRELLA DÍAZ GARCÍA**

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

Linares Nuevo León, México.

Diciembre 2020

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



Cuantificación de las Emisiones de Gases Efecto  
Invernadero producto de Incendios Forestales utilizando  
Métodos Indirectos.

PRESENTA:

ING. KARLA ESTRELLA DÍAZ GARCÍA

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Linares Nuevo León, México.

Diciembre 2020

**Cuantificación de las Emisiones de Gases de Gases Efecto Invernadero producto de Incendios Forestales utilizando Métodos Indirectos.**

**Aprobación de Tesis**



---

Director.

Dr. Eduardo Javier Treviño Garza.



---

Codirector.

Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón.



---

Asesor.

Dr. Eduardo Alanís Rodríguez.



---

Asesor Externo.

Dr. José Israel López Martínez.

Linares Nuevo León, México.

Diciembre 2020

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo otorgado para la realización de los estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por el financiamiento del trabajo de campo a través del proyecto CT705-19 “Monitoreo y evaluación de los ecosistemas forestales del sur de Nuevo León usando técnicas geomáticas” y el proyecto CT1256-20 “Estimación del volumen y la biomasa aérea de comunidades boscosas en el centro-sur de Nuevo León” del Programa de Apoyo a la Investigación científica y tecnológica.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por permitirme desarrollarme profesionalmente, especialmente a mis profesores que con su experiencia y conocimiento contribuyeron con mi formación.

Al Dr. Eduardo Javier Treviño Garza, por orientarme en el desarrollo de este trabajo y durante mi formación académica con sus consejos y su motivación a seguir adelante.

Al Dr. Oscar Aguirre Calderón, Dr. Eduardo Alanís Rodríguez y Dr. José Israel López Martínez por sus buenas aportaciones en este trabajo, consejos y acertados comentarios.

Al Consejo Universitario de la UANL, principalmente a la Lic. Griselda González.

A las personas que integraron el equipo de trabajo en campo encabezado por mis amigos de maestría: Selena Aranda Palomino y José Daniel Ramírez Zamora agradezco su buena disposición y apoyo, al técnico Humberto López Alejandro por su ayuda en llegar a los sitios incendiados, les agradezco mucho.

Al Laboratorio de Geomensura de la Facultad de Ciencias Forestales por brindarme todo el equipo necesario para las salidas a campo.

A mi familia, mis padres José Luis Díaz García y María Trinidad García Jantes gracias por todo el apoyo, a mis hermanas: Cris, Amapola, Azucena y Reyna por siempre estar a mi lado apoyándome.

A mi novio Rodolfo Alejandro Martínez Soto por todo su apoyo y amor.

A mis amigos y compañeros de posgrado, María Escoto, Francisco Moreno, Sandra Solís, Selena Aranda, Fabian Perales, Ignacio Tamez, Daniel Ramírez, Bulmaro Avendaño, Denis Acosta y Felipe Morales.

A todas las personas que de alguna u otra manera contribuyeron al desarrollo de este trabajo mi más sincero agradecimiento.

## **Dedicatoria**

*Con cariño a mí:*

*Abuelito José Cruz García Manzano †*

*Mis padres José Luis Díaz García y María Trinidad García Jantes*

*Mis hermanas*

# ÍNDICE

<b>1.0 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2.0 ANTECEDENTES.....</b>	<b>3</b>
2.2.1 Incendio Subterráneo .....	4
2.2.2 Incendio Superficial .....	4
2.2.3 Incendio Aéreo o de Copa .....	4
<b>2.3 COMPORTAMIENTO DEL FUEGO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.4 IMPACTO ECOLÓGICO DEL FUEGO.....</b>	<b>5</b>
2.4.1 Efecto del Fuego sobre los Ecosistemas.....	5
<b>2.5 EMISIONES GENERADAS POR LOS INCENDIOS FORESTALES .....</b>	<b>5</b>
<b>2.6 COMBUSTIÓN DE LA VEGETACIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>2.7 GASES EMITIDOS EN INCENDIOS FORESTALES .....</b>	<b>8</b>
2.7.1 Dióxido de Carbono .....	9
2.7.2 Metano.....	9
2.7.3 Óxido Nitroso.....	10
2.7.4 Monóxido de Carbono .....	10
<b>2.8 CONCENTRACIONES ATMOSFÉRICAS DE LOS PRINCIPALES GASES EFECTO INVERNADERO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.9 SITUACIÓN DE MÉXICO ANTE LAS EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO POR INCENDIOS FORESTALES.....</b>	<b>11</b>
<b>2.10 INCENDIOS FORESTALES EN MÉXICO .....</b>	<b>13</b>
2.10.1 Incendios Forestales en Nuevo León .....	15
<b>2.11 DETECCIÓN Y MONITOREO DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE .....</b>	<b>15</b>
<b>2.12 INDICES MULTIESPECTRALES .....</b>	<b>16</b>
2.12.1 Índice Normalizado de Áreas Incendiadas (NBR).....	16
2.12.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	17
<b>2.13 ESTUDIOS A FINES EN MATERIA DE EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO .....</b>	<b>18</b>
<b>3.0 JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>19</b>

<b>4.0 HIPÓTESIS</b>	20
<b>4.1 OBJETIVOS</b>	20
4.1.1 General:	20
4.1.2 Específicos:	20
<b>5.0 MATERIALES Y MÉTODOS</b>	21
5.1 Descripción del área de estudio	21
5.1.1 Localización	21
5.1.2 Clima	22
5.1.3 Geología	22
5.1.4 Edafología	23
5.1.5 Vegetación	23
<b>6.0 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN</b>	24
6.1 Análisis de Imágenes Satelitales	24
6.1.2 Procesamiento de las imágenes satelitales	24
6.1.3 Aplicación de Índices Multiespectrales	25
<b>6.2 Cálculos de las Emisiones de Gases Efecto Invernadero</b>	29
<b>7.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	32
7.0.1 Emisiones de GEI producidas por Incendios	32
7.0.2 Detección de Cambios de Cobertura	39
7.0.3 Detección de Cambios en base a las Series de Uso de Suelo y Vegetación	45
<b>8.0 CONCLUSIONES</b>	48
<b>9.0 LITERATURA CITADA</b>	50
<b>10.0 ANEXOS</b>	55
10.1 Verificación de las Áreas Incendiadas del Ejido “Tepozanes”	56

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Componentes químicos reportados de los incendios forestales. ....	8
<b>Tabla 2.</b> Bandas espectrales en Landsat 5 y 8 para la aplicación de índice de áreas incendiadas. ....	25
<b>Tabla 3.</b> Relación del índice $\Delta NBR$ y la severidad (Key y Benson, 1999). ....	27
<b>Tabla 4.</b> Bandas espectrales en Landsat 5 y 8 para la aplicación de índice de vegetación normalizada. ....	28
<b>Tabla 5.</b> Macro clases establecidas para la clasificación supervisada. ....	28
<b>Tabla 6.</b> Periodos evaluados. ....	29
<b>Tabla 7.</b> Biomasa por tipo de vegetación (IPCC, 2013). ....	30
<b>Tabla 8.</b> Factor de consumo $C_f$ por tipo de vegetación (IPCC, 2013.) ....	30
<b>Tabla 9.</b> Factor de emisión $G_{ef}$ por tipo de gas de efecto invernadero (IPCC, 2013). ....	31
<b>Tabla 10.</b> Emisiones por gas de efecto invernadero. ....	33
<b>Tabla 11.</b> Número de hectáreas por clase y porcentaje del número de hectáreas con respecto al total de ha para los distintos años. ....	43
<b>Tabla 12.</b> Cambios en el uso de suelo y vegetación en base a las cartas de INEGI. ....	45



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Fases de la Combustión de la Vegetación (ICONA,1993). ....	7
<b>Figura 2.</b> Concentraciones atmosféricas de los principales GEI (Forster et al, 2007). ....	11
<b>Figura 3.</b> Incendios Forestales Históricos de México (SNIGF,2019). ....	13
<b>Figura 4.</b> Causas comunes de Incendios Forestales (SNIGF,2019). ....	14
<b>Figura 5.</b> Incendios Forestales en Nuevo León (SNIGF,2019). ....	15
<b>Figura 6.</b> Tipos señales en un incendio: a) superficies recientemente quemadas, b) pérdida de la masa afectada forestal (ICONA,1993). ....	16
<b>Figura 7.</b> Comparación de reflectancias de un árbol saludable y otro con deficiencias (Elaboración propia). ....	17
<b>Figura 8.</b> Localización del área de estudio (Elaboración propia, usando datos del INEGI). ....	21
<b>Figura 9.</b> A) Interpretación visual de áreas incendiadas año 2011. ....	26
<b>Figura 10.</b> B) Áreas detectadas con índice NBR año 2011. ....	26
<b>Figura 11.</b> Incendios para periodo 2008-2018 Zaragoza, N.L. ....	32
<b>Figura 12.</b> Porcentaje de Emisiones de Gases Efecto Invernadero. ....	34
<b>Figura 13.</b> Emisiones de Dióxido de carbono por año. ....	34
<b>Figura 14.</b> Emisiones de Monóxido de carbono por año. ....	35
<b>Figura 15.</b> Emisiones de Metano por año. ....	35
<b>Figura 16.</b> Emisiones de Óxido de nitrógeno por año. ....	36
<b>Figura 17.</b> Emisiones de Óxido nitroso por año. ....	36
<b>Figura 18.</b> Emisiones de Gases Efecto Invernadero por tipos de Vegetación. ...	37
<b>Figura 19.</b> Clasificación Supervisada para el año 2008. ....	39
<b>Figura 20.</b> Clasificación Supervisada para el año 2013. ....	40
<b>Figura 21.</b> Clasificación Supervisada para el año 2018. ....	40
<b>Figura 22.</b> Resultados del NDVI año 2008. ....	41
<b>Figura 23.</b> Resultados del NDVI año 2013. ....	41
<b>Figura 24.</b> Resultados del NDVI año 2018. ....	42
<b>Figura 25.</b> Comportamiento de las clases a través del periodo de estudio. ....	44
<b>Figura 26.</b> Mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie IV. ....	47
<b>Figura 27.</b> Mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie VI. ....	47

## RESUMEN

Los incendios forestales son un elemento fundamental para la renovación de los ecosistemas; su estudio es diverso desde su origen y su comportamiento hasta las afectaciones en el ecosistema, sin embargo, es importante considerar que la combustión de la biomasa libera a la atmósfera gases de efecto invernadero, que podrían tener incidencia en la modificación de los patrones climáticos actuales. Debido a esto esta presente investigación propone la cuantificación de los gases efecto invernadero (GEI) en el municipio de General Zaragoza, Nuevo León en el periodo de 2008- 2018. Se utilizó la metodología propuesta por el IPCC, además se determinaron dos índices basados en el procesamiento de imágenes de satélite: el índice de vegetación normalizado (NDVI) para evaluar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación y el índice normalizado de áreas incendiadas (NBR) para detectar el área afectada y la severidad del incendio. El número de incendios detectados fue de 43 y afectaron una superficie de 3,687.1 ha; las emisiones de gases efecto invernadero en el periodo evaluado totalizaron 290,132.83 Mg, los años con mayores emisiones fueron los de mayor superficie afectada, el año de 2011 fue el que presentó mayores emisiones; los tipos de vegetación que más se afectaron fue el bosque de encino-pino y bosque de encino. El gas de efecto invernadero que más aporta a los incendios es el dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y el que menos el óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$ . El cambio de uso de suelo y vegetación para el municipio muestra que las áreas de pastizales aumentan un 0.02%, la zona urbana, las áreas agrícolas y los matorrales ha mantenido sus superficies; sin embargo, las áreas boscosas han disminuido su vegetación en 0.03%, por lo cual las áreas de vegetación secundaria van en aumento. La generación de este tipo de información ayuda a la toma de decisiones para la generación de medidas de mitigación, prevención y combate de incendios forestales.

## **ABSTRACT**

Forest fires are a fundamental element for the renewal of ecosystems; Its study is diverse from its origin and its behavior to the effects on the ecosystem, however, it is important to consider that the combustion of biomass releases greenhouse gases into the atmosphere, which could have an impact on the modification of current climate patterns . Due to this, this research proposes the quantification of greenhouse gases (GHG) in the municipality of General Zaragoza, Nuevo León in the period 2008-2018. The methodology proposed by the IPCC was used, in addition, two indices based on the processing of satellite images: the normalized vegetation index (NDVI) to evaluate the quantity, quality and development of vegetation and the normalized index of burned areas (NBR) to detect the affected area and the severity of the fire. The number of fires detected was 43 and affected an area of 3,687.1 ha; greenhouse gas emissions in the evaluated period totaled 290,132.83 Mg, the years with the highest emissions were those with the largest affected area, the year 2011 was the one with the highest emissions; the types of vegetation that were most affected were the oak-pine forest and oak forest. The greenhouse gas that contributes the most to fires is carbon dioxide CO<sub>2</sub> and the one that contributes the least, nitrous oxide N<sub>2</sub>O. The change in land use and vegetation for the municipality shows that the grassland areas increase by 0.02%, the urban area, the agricultural areas and the scrublands have maintained their surfaces; however, the forested areas have decreased their vegetation by 0.03%, for which the secondary vegetation areas are increasing. The generation of this type of information helps decision-making for the generation of mitigation, prevention and fight against forest fires.

## 1.0 INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales son imprescindibles para la vida en el planeta ya que aportan servicios ambientales y son fuente de materias primas en muchas de las actividades humanas.

En las últimas décadas se ha promovido la conservación y uso sustentable de los ecosistemas. A pesar de que el fuego es parte de los procesos de regulación de los ecosistemas, los incendios forestales recurrentes los afectan en gran medida considerándose uno de los fenómenos más comunes y extendidos sobre todo el planeta (García, 2015).

Dentro de las causas de la alta ocurrencia de incendios se destaca la acción humana ya que más del 90% de los incendios que se presentan, se deben a prácticas de uso inadecuado del fuego para la agricultura y quemas intencionales en zonas forestales (CONAFOR, 2012).

Aunado a los incendios forestales los procesos de expansión e intensificación agrícola producen degradación del suelo y altas emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Estas emisiones se generan principalmente por la deforestación en las regiones tropicales, las emisiones de metano provenientes de la ganadería y de los cultivos de arroz y de óxido nitroso derivado del uso de fertilizantes en la agricultura (FAOSTAT, 2014).

Entre los principales (GEI) emitidos por las actividades antropogénicas a nivel mundial son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Globalmente, la causa principal del incremento en las emisiones de éstos GEI son las actividades relacionadas con el sector energético que representan 26% de las emisiones, seguido del sector industrial (19%), forestal (17%), agrícola (14%), residencial y comercial (8%) y de manejo de desechos (3%) (IPCC, 2013).

Al producirse un incendio forestal la biomasa se consume, por lo que algunos autores consideran que los ecosistemas forestales pasan de ser acumuladores a emisores de carbono, se estima que los incendios forestales aportan con un 20% del total de gases efecto invernadero a nivel global (Sandberg *et al.*, 2002; Valero *et al.*, 2013).

Los inventarios de emisiones de GEI son un paso necesario para la creación de programas de mitigación de emisiones para reducir el impacto del cambio climático y la contaminación ambiental. Contar con un inventario de emisiones sirve para identificar fuentes que estén sujetas a posibles medidas de control y evaluar la efectividad de estas (INE,2005).

Un inventario de emisiones GEI sustentado científicamente nos proporciona información robusta y confiable para diferentes aplicaciones como: identificar las contribuciones de la emisión por sectores y categorías de fuentes, determinar oportunidades potenciales de reducción de emisiones directamente de la fuente, evaluar la efectividad de las medidas de mitigación, determinar la aplicabilidad de permisos y requerimientos regulatorios de emisiones, así como determinar el grado de cumplimiento de una fuente con las condiciones de los permisos ambientales, identificar las oportunidades potenciales de aplicación de sistemas de compensación. Es conveniente considerar estos beneficios al evaluar el impacto de las medidas de control de GEI.

## **2.0 ANTECEDENTES**

El fuego tiene un rol muy importante dentro de los ecosistemas, al igual que otros fenómenos naturales; generalmente se convierte en un problema cuando interviene el ser humano. Por lo cual en nuestro país se han establecido estrategias para reducir al mínimo los efectos de los incendios forestales, en 1972 fue creado el Programa Nacional de Protección contra los Incendios Forestales, el cual fue trasferido en 2002 a la Comisión Nacional Forestal y está en coordinación con los gobiernos de los estados y municipios (CONAFOR, 2018).

Muchas veces se ha catalogado a los incendios como importantes factores de degradación de ecosistemas, sin embargo, su ocurrencia tiene efectos benéficos o dañinos dentro de los ecosistemas que dependen del comportamiento del fuego. Para entender cómo es que los incendios se desarrollan y que efectos tienen sobre los ecosistemas se describen a continuación los siguientes antecedentes.

### **2.1 INCENDIOS FORESTALES**

Es la propagación libre del fuego sobre la vegetación forestal, ya sea por causas naturales o inducidas con una ocurrencia y propagación no controlada; en primera estancia los incendios forestales representan costos económicos durante su combate y extinción, generan daños a la salud de las personas , contribuyen a la emisión de las partículas atmosféricas, aumentan la pérdida de recursos maderables y no maderables, aumentan los costos de restauración e impactan de manera negativa en la calidad de los servicios ambientales ofrecidos por los bosques (SEMARNAT,2000).

Sin embargo, el impacto de los incendios depende de varios factores, el tipo de incendio influye directamente con el daño o beneficio que le pueda provocar; los incendios forestales se clasifican en tres tipos (Chandler,1983).

## **2.2 CLASIFICACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES**

### **2.2.1 Incendio Subterráneo**

Este tipo de incendio ocurre entre la materia orgánica que se encuentra en la superficie y la capa mineral del suelo, principalmente en raíces, hojarasca, residuos vegetales en descomposición, humus e incluso puede alcanzar afloramientos rocosos, generalmente no producen llamas y emiten poco humo.

### **2.2.2 Incendio Superficial**

Este tipo de incendio consume cualquier tipo de combustible que se encuentre situado encima de la superficie del terreno y por debajo de la copa de los árboles; comprende hojarasca, ramas muertas, acículas, troncos caídos, y vegetación herbácea; este incendio es el más común.

### **2.2.3 Incendio Aéreo o de Copa**

Este tipo de incendio se propaga a través de la copa de los árboles y por la intensidad del fuego, llega a dañar severamente el ecosistema ya que este tipo es el más peligroso ya que poco se puede hacer para su control.

## **2.3 COMPORTAMIENTO DEL FUEGO**

Es la forma en que avanza el fuego en cuanto a su velocidad, intensidad, su tasa de crecimiento perimetral y de área, configuración y la altura promedio que alcanzan las llamas, así como el tipo de incendio: superficial, aéreo o subterráneo. El comportamiento de un incendio forestal está dado por tres factores: A) los combustibles existentes en el lugar, B) la topografía del terreno, C) las características del tiempo atmosférico (Rodríguez *et al*, 2002).

## 2.4 IMPACTO ECOLÓGICO DEL FUEGO

El fuego juega un papel natural e importante en todos los ecosistemas forestales; de acuerdo con Arno, (1980) el fuego tiene una alta influencia sobre varios de los elementos de los ecosistemas vegetales. Algunos de los aspectos en los que el fuego afecta a los ecosistemas son los siguientes:

- Las propiedades físicas y químicas del suelo.
- La acumulación de materia seca.
- Las adaptaciones genéticas de las especies.
- Hábitat y poblaciones naturales.
- La abundancia de insectos, parásitos y hongos.

### 2.4.1 Efecto del Fuego sobre los Ecosistemas

El fuego produce efectos sobre los balances hidrológicos, genera cambios en la vegetación, fauna y el suelo además se puede afectar la calidad del aire y la atmósfera e incluso efectos en la calidad del paisaje (Urquiza *et al*, 2004). Los efectos del fuego sobre la vegetación pueden variar significativamente, esto dependerá del comportamiento del fuego, la duración, el patrón de consumo del combustible, la intensidad del calentamiento superficial, la mortalidad de las plantas y su posterior recuperación (Miller, 2000). La mortalidad de la vegetación dependerá de las temperaturas alcanzadas y el tiempo de exposición al fuego; la mayoría de las células de las plantas mueren al someterse a temperaturas entre los 50- 55 °C (Wright y Bailey, 1982; López, 2015).

## 2.5 EMISIONES GENERADAS POR LOS INCENDIOS FORESTALES

La quema de biomasa es una fuente significativa de GEI, ya que contribuye del 20 al 50 % de las emisiones globales de estos gases (Yadav *et al*, 2017). La combustión de la biomasa libera grandes cantidades de partículas y gases que tienen un impacto significativo en el ambiente, el ecosistema así mismo como para la salud humana.



Estas emisiones son una mezcla compleja de gases y partículas, las más abundantes son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el monóxido de carbono (CO) y metano ( $\text{CH}_4$ ); además se pueden encontrar en abundancia aerosoles en forma de carbono orgánico y partículas de carbón negro ( $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$ ), estos últimos se ha documentado que son dañinos para la salud humana (Johnston *et al.* 2012, Gilman *et al.* 2015).

La composición y la cantidad de emisiones va a depender de varios factores como las características de los combustibles; su estructura, disposición componentes químicos, su etapa de crecimiento, así mismo como su contenido de humedad y lignificación de la madera además del tiempo atmosférico (Urbanski, 2014). Sin embargo, la cantidad de emisiones también dependerá del tamaño del área afectada, del tipo y la cantidad de vegetación quemada, el tipo de combustión y tipo de incendio (Freitas *et al.* 2005, Cochrane y Ryan 2009).

## 2.6 COMBUSTIÓN DE LA VEGETACIÓN

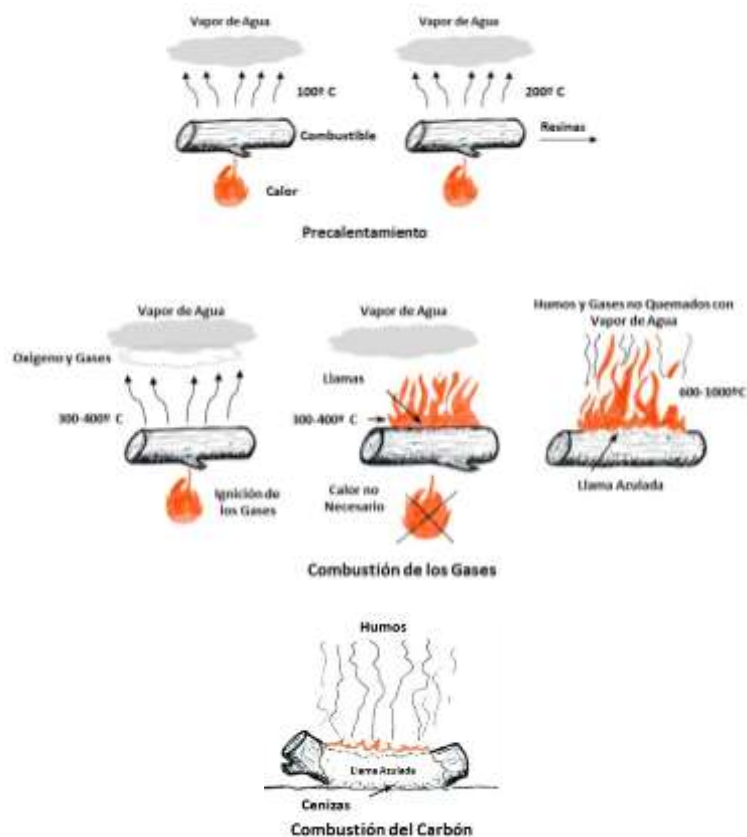
Existen diferentes fases de la combustión de la vegetación propuesta por (Larkin *et al.*, 2014) la cual está compuesta por cuatro fases: pre-ignición (pre-ignition), flama (flamming), combustión a baja temperatura y sin flama (smoldering) y la combustión final (glowing pase), (Figura 1).

Durante la fase de pre-ignición los combustibles se calientan por radiación y convección y el vapor de agua se conduce a la superficie de los combustibles y se expulsa a la atmósfera; a medida que aumenta la temperatura la celulosa, hemicelulosa y lignina se comienza a descomponer y liberar gases, se alcanzan temperaturas de 325- 355 °C.

En la fase de flama la temperatura aumenta rápidamente ya que oscilan entre los 500-1900 °C y los principales gases que se libean en esta etapa son  $\text{CO}_2$  y vapor de agua.

En la tercera fase de combustión latente (smoldering) disminuye la tasa de propagación de incendios y la temperatura de combustión de 300-600 °C, hay más emisión de gases y vapores apareciendo como humo visible; cerca del final de esta etapa queda el combustible que no se consumió completamente como una capa de carbón negro (partículas).

Finalmente, en la etapa cuatro de combustión incandescente (glowing) la mayoría de ellos gases volátiles ya se liberaron mientras que los combustibles restantes brillan color naranja, los gases que se liberaron en esta etapa son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ). Esta fase continúa hasta que la temperatura del combustible baje o hasta que solo quede ceniza (Ottmar, 2014).



**Figura 1.** Fases de la Combustión de la Vegetación (ICONA,1993).

## 2.7 GASES EMITIDOS EN INCENDIOS FORESTALES

De acuerdo con la literatura de diferentes estudios realizados sobre las emisiones de gases efecto invernadero producidas por incendios se encontraron 28 elementos, donde 26 de ellos son componentes químicos y los dos restantes se refieren a partículas lo que se conoce como carbón negro (CN), (Tabla 1).

Cabe a destacar que los componentes principales son el CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO y las partículas menores las cuales reciben mucha atención debido a los efectos en la salud humana, los cuales se mencionaran a continuación.

**Tabla 1.** Componentes químicos reportados de los incendios forestales.

No.	Componente Químico	Fórmula
1	Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>
2	Monóxido de Carbono	CO
3	Metano	CH <sub>4</sub>
4	Amoniaco	NH <sub>3</sub>
5	Óxidos de Nitrógeno	NO <sub>x</sub>
6	Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
7	Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
8	Formaldehído	CH <sub>2</sub> O
9	Metanol	CH <sub>3</sub> OH
10	Ácido Acético	CH <sub>3</sub> COOH
11	Ácido Fórmico	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
12	Óxido Nítrico	NO
13	Dióxido de Nitrógeno	NO <sub>2</sub>
14	Óxido Nitroso	N <sub>2</sub> O
15	Cianuro de Hidrogeno	HCN
16	Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O
17	Propadieno	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>
18	Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
19	Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
20	Fenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O
21	Dióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>
22	Hidrogeno	H <sub>2</sub>
23	Compuestos Orgánicos No Metanos	NMOC
24	Hidrocarburos no Metanos	TNMHC
25	Carbón Negro	BC
26	Carbono Orgánico	OC
27	Partículas menores o igual a 2.5 micrómetros	PM <sub>2.5</sub>
28	Partículas menores a 10 micrómetros	PM <sub>10</sub>

### 2.7.1 Dióxido de Carbono

Este gas es sumamente abundante en la Tierra y es indispensable en numerosos compuestos orgánicos como los hidrocarburos, en el aire que exhalamos los seres vivos y es de importancia biológica en los procesos de la fotosíntesis. Las principales fuentes de este gas se clasifican en dos tipos de origen natural y antropogénico; las primeras se producen por los procesos de respiración, descomposición de la materia orgánica, erupciones volcánicas, incendios forestales; las fuentes antropogénicas que producen CO<sub>2</sub> en sus procesos industriales son con la quema de los combustibles fósiles como carbón, petróleo, gas natural, procesos manufactureros, fabricación de cemento y acero, cambio de uso de suelo.

Actualmente la cantidad de dióxido de carbono atmosférico ha aumentado desde el uso de los combustibles fósiles para la producción de la energía eléctrica, el transporte, el acondicionamiento de edificios, en la manufactura y otros productos aunado a esto la deforestación libera CO<sub>2</sub>.

### 2.7.2 Metano

Actualmente las emisiones de este gas se han elevado como resultado de las actividades humanas relacionadas con la agricultura, la distribución del gas natural y tiraderos de basura también es liberado de manera natural como los humedales; en los últimos años las concentraciones de metano han aumentado en cantidad de 1% por año (IPCC,2007).

Las principales fuentes de este gas son en los pantanos por la descomposición bacteriana de la materia orgánica, en las plantaciones de arroz, y por insectos como las termitas en sus procesos digestivos; sin embargo, el 60% de las emisiones en el mundo son de origen antropogénico como la combustión de los combustibles fósiles, incendios forestales y en las actividades ganaderas.

### 2.7.3 Óxido Nitroso

Es un gas incoloro con un olor dulce y ligeramente tóxico, es emitido por las actividades humanas como el uso de fertilizantes y la quema de combustibles fósiles. Su principal sumidero es a través de reacciones fotoquímicas en la estratosfera que afectan la abundancia del ozono estratosférico.

La fuente más importante de óxido nitroso son las emisiones generadas por los suelos agrícolas y en menor grado por el consumo de combustibles fósiles; las emisiones generadas por los suelos agrícolas se deben principalmente al proceso microbiológico de la nitrificación y desnitrificación del suelo se distinguen tres tipos de emisiones: a) las directas del suelo, b) las directas de óxido nitroso del suelo debido al pastoreo, c) las indirectas generadas por el uso de fertilizantes; las fuentes antropogénicas de menor importancia en la producción de  $N_2O$  son la fabricación de ácido nítrico, nylon, tratamientos de aguas residuales y la quema de residuos e incendios forestales.

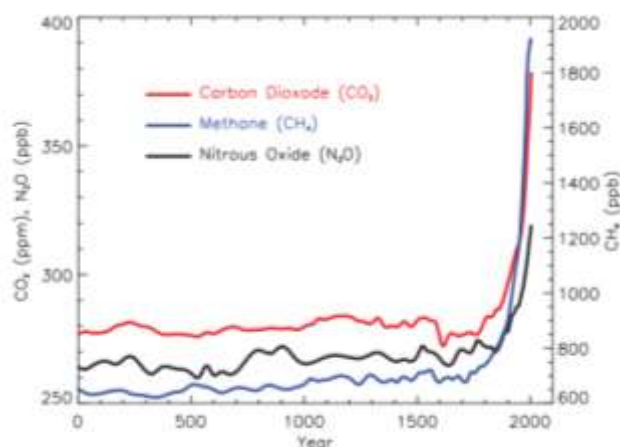
### 2.7.4 Monóxido de Carbono

Es un gas indoloro e insípido es el principal sumidero de radicales hidroxilos (OH), es un componente de la amplia variedad de reacciones que oxidan al carbón, nitrógeno y azufre. Este es un gas efecto invernadero indirecto creado cuando el carbono contenido en los combustibles es quemado incompleta y posteriormente es oxidado a  $CO_2$  a través de los procesos naturales.

Los océanos constituyen la segunda gran fuente de CO atmosférico, también las algas y otras fuentes biológicas aportan cantidades sustanciales, los volcanes y los incendios forestales también constituyen una fuente significativa de emisiones. La mayoría de las emisiones de CO proviene de fuentes estacionarias o móviles que queman combustibles como automotores.

## 2.8 CONCENTRACIONES ATMOSFÉRICAS DE LOS PRINCIPALES GASES EFECTO INVERNADERO

En la siguiente figura se muestran las concentraciones en la atmósfera de los tres principales gases efecto invernadero a lo largo de los últimos 2000 años. Se puede observar un incremento a partir del año 1750 que se le atribuye a la era industrial, las unidades de concentración son partes por millón (ppm), que indica el número de moléculas del gas de efecto invernadero por millón de moléculas de aire, en una muestra atmosférica (Figura 2). La concentración de CO<sub>2</sub> tiene mayor magnitud respecto a las unidades de los otros gases como el metano y óxido nitroso; por lo cual el dióxido de carbono es el GEI que contribuye mayormente al cambio climático (Forster *et al*, 2007).



**Figura 2.** Concentraciones atmosféricas de los principales GEI (Forster *et al*, 2007).

## 2.9 SITUACIÓN DE MÉXICO ANTE LAS EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO POR INCENDIOS FORESTALES

En México cada año ocurren incendios forestales entre los años de 1998 - 2013 se registró un promedio de 8,717 incendios los cuales afectaron una superficie de 317,869 hectáreas por año, sin embargo, en los años 1998 y 2011 se presentaron más incendios debido a que fueron años atípicos muy secos en nuestro país.

Cada año los incendios forestales representan una fuente de emisión de gases, México es responsable del 1.5% de las emisiones globales de gases efecto invernadero (INECC, SEMARNAT,2015).

México realizó un compromiso ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el cual consiste en: elaborar actualizar periódicamente, publicar y facilitar a la conferencia de las partes inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas por las fuentes y de la absorción por los sumideros de todos los gases efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, utilizando metodologías comparables que se acordaron en la conferencia de partes. Por ello el Instituto de Ecología y Cambio Climático (INECC), elaboró el Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero (INEGEI) de los principales sectores de la economía nacional.

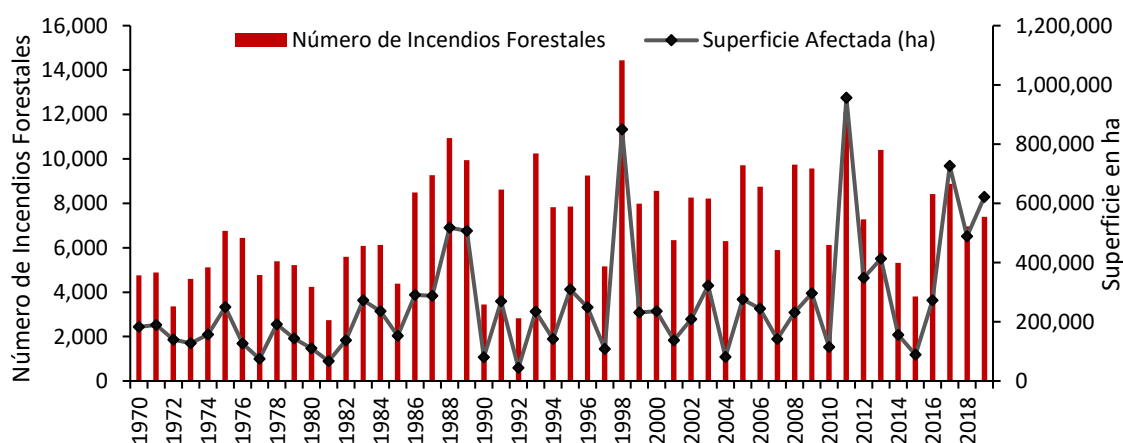
Los sectores a los cuales se le realizan estas estimaciones de los GEI son: fuentes móviles, generación eléctrica, residencial y comercial, petróleo y gas, industria, agropecuario, residuos, usos de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (USCUSS). En el año de 2013 se emitieron un total de 665,305 Gg de CO<sub>2</sub>, el sector que más emitió gases de efecto invernadero fue el sector transporte 26.2%, seguido del sector eléctrico con 19%, industrial con 17.3%, las emisiones de producción, transporte, distribución y procesamiento y uso de petróleo y gas con un 12.1%, agropecuario con un 12%, USCUSS con un 4.9%, residuos con 4.6% y el sector residencial y comercial con 3.9% (SEMARNAT,2015).

Las emisiones derivadas del sector Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura (USCUSS) se han agrupado en seis categorías: 1) tierras convertidas a tierras forestales, 2) tierras convertidas a pastizales, 3) tierras convertidas a tierras agrícolas, 4) tierras convertidas a asentamientos humanos, 5) tierras convertidas a otras tierras, 6) incendios forestales. Dentro de este sector los incendios forestales ocupan el segundo lugar de emisiones con un 21.4 % del sector (9,614.08 Gg de CO<sub>2</sub>) (INECC,2015).

## 2.10 INCENDIOS FORESTALES EN MÉXICO

Los incendios forestales han contribuido en todo el mundo al deterioro de los recursos naturales, generando pérdidas económicas y vidas humanas, sin embargo, nuestro país no es la excepción de acuerdo con las condiciones climáticas y meteorológicas, cada año se presentan incendios forestales de diversas magnitudes. En muchos sistemas ecológicos los incendios tienen un gran impacto negativo por la degradación que sufre el suelo y la cobertura vegetal y por las emisiones de gases efecto invernadero; sin embargo los efectos no necesariamente son negativos por ejemplo, en los bosque templados después de un incendio se propicia el rebrote de pasto para la alimentación de ganado y fauna silvestre , se facilita la germinación de semillas y se abate los combustibles ligeros , se controlan ciertas plagas, enfermedades y vegetación indeseable.

De 1970 a 2006 han ocurrido un promedio de 7,000 incendios forestales por año afectándose un promedio de 221,179 hectáreas. El año de 1998 fue uno de los peores para México ya que ocurrieron 14,445 incendios y afectaron casi 850,000 ha, también en 2011 se presentaron 12,113 incendios con una afectación de 956,405 ha como se muestra en la Figura 3 (SNIGF,2019).



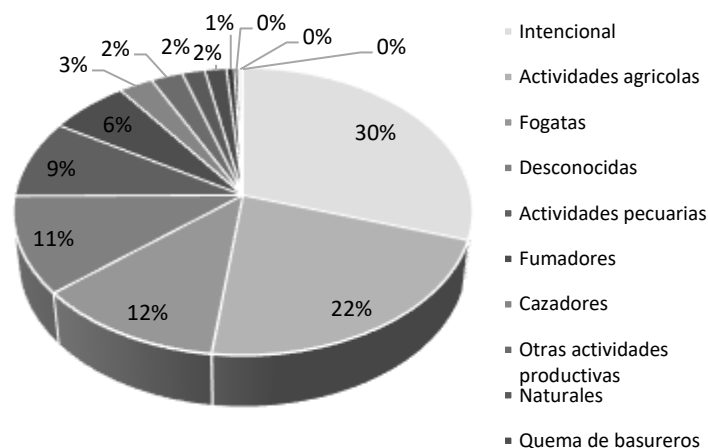
**Figura 3.**Incendios Forestales Históricos de México (SNIGF,2019).



Las causas de los incendios forestales en México se atribuyen principalmente a las actividades humanas 98% y el resto se debe a causas naturales derivadas de fenómenos como descargas eléctricas o erupción de volcanes. Para 2019 se calcula que las actividades agrícolas representan 22%, pecuarias 11% de las causas que originan los incendios forestales, le siguen causas intencionales con 30%, fumadores con 6%, fogatas 12%, desconocidas 11% y el resto 13% (Figura 4) (SNIGF,2019).

Las causas de los incendios se catalogan de la siguiente manera (Ressl, R.el.Cruz, 2012):

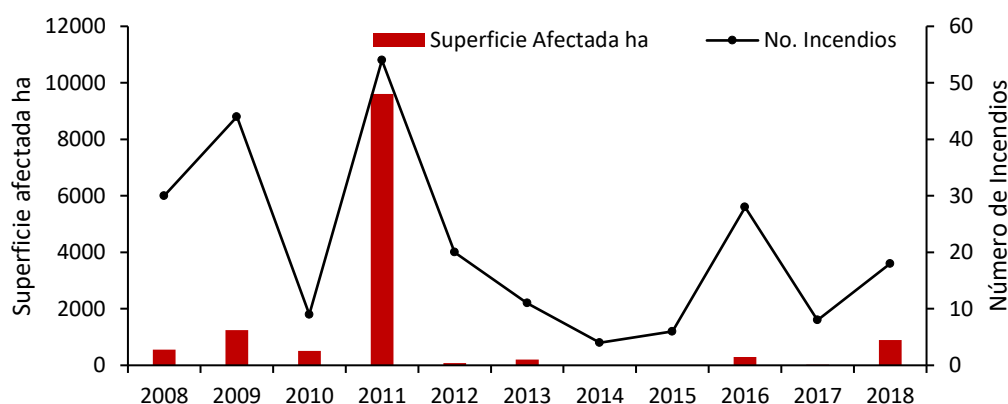
- Accidentales: Relacionados con accidentes automovilísticos, ferroviarios y aéreos con ruptura de líneas eléctricas.
- Negligencias: Tiene que ver con quemas agropecuarias no controladas, fogatas de excursionistas, fumadores, quema de basura, limpieza de vías en carreteras y uso del fuego en otras actividades productivas dentro de las áreas forestales.
- Intencionales: Se refiere a las quemas que se realizan en el contexto de conflictos entre personas o comunidades, tala ilegal o litigios, entre otros.
- Naturales: Tormentas eléctricas (rayos) o erupciones volcánicas.



**Figura 4.**Causas comunes de Incendios Forestales (SNIGF,2019).

### 2.10.1 Incendios Forestales en Nuevo León

Para el estado de Nuevo León en el periodo de 2008 al 2018 se han presentado 232 incendios forestales, los cuales han afectado una superficie de 13,419.45 ha. Sin embargo, el año de 2011 para el estado fue el que presentó mayor número de incendios reportándose 54 los cuales consumieron 9,603.5 ha. Es importante mencionar que en 2009 se reportaron 44 incendios los cuales afectaron 1,242 ha como se muestra en la (Figura 5) (SNIGF,2019).



**Figura 5.**Incendios Forestales en Nuevo León (SNIGF,2019).

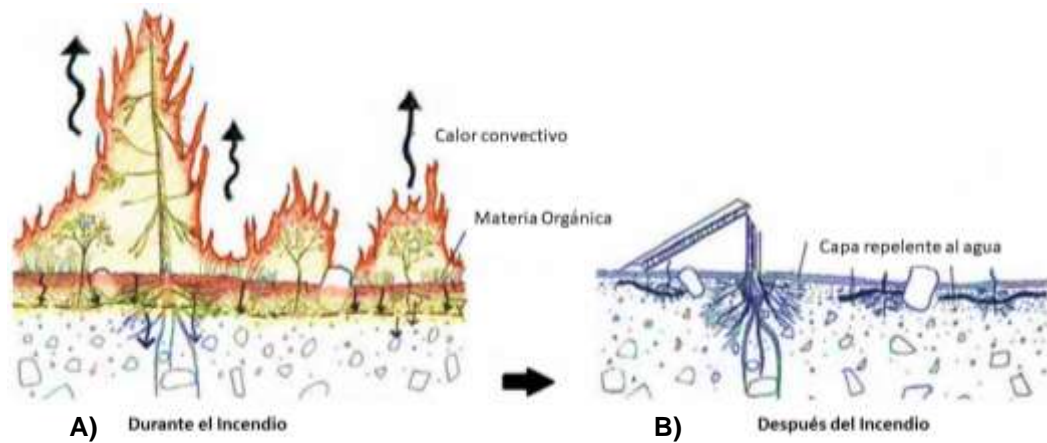
### 2.11 DETECCIÓN Y MONITOREO DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE

Después del incendio de 1998 se hizo evidente la necesidad de encontrar una solución tecnológica para la detección y análisis de la propagación de incendios forestales, por lo cual la CONABIO en 1999 implementó un sistema de detección de puntos de calor utilizando imágenes diurnas y nocturnas con el sensor (Advanced Very High Resolution Radiometer). Posteriormente en 2001 incorporó el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), para mejorar el algoritmo que actualmente conforman el sistema de Alerta Temprana de incendios para México. También para la detección de áreas incendiadas se pueden utilizar índices multispectrales los cuales se mencionan a continuación.

## 2.12 INDICES MULTIESPECTRALES

### 2.12.1 Índice Normalizado de Áreas Incendiadas (NBR)

Tras un incendio existen dos tipos diferentes de señales, la que corresponde a superficies recientemente quemadas, donde la señal se produce como consecuencia de la combustión de la vegetación y otra más duradera, que se produce como consecuencia del deterioro o la pérdida de la masa forestal afectada por el fuego (Robinson y Bodmer, 1999). La segunda señal es más estable ya que su persistencia es variable y depende de la vegetación y la climatología del área afectada, y esta variación puede ser debido a otras razones distintas al efecto del fuego; por ello se precisan imágenes posteriores al incendio, como se muestra en la Figura.6.



**Figura 6.**Tipos señales en un incendio: a) superficies recientemente quemadas, b) pérdida de la masa afectada forestal (ICONA,1993).

Este índice ofrece una mejor respuesta para el caso específico de los incendios forestales, ya que utiliza las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo cercano de onda corta; sus valores son de 0 y 1.

Este índice se presenta en la siguiente ecuación.

$$NBR = \frac{Band_{IR} - Band_{SWIR}}{Band_{IR} + Band_{SWIR}}$$

Donde:  $Band_{IR}$  y  $Band_{SWIR}$  son las reflectancias a nivel de superficie de las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta respectivamente.

### 2.12.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Este índice refleja las características de biomasa aérea y es considerado como un indicador de vigor vegetal, combina las bandas del rojo e infrarrojo cercano. Los datos que se obtienen de un NDVI se encuentran en el rango de 1 a -1; los valores más cercanos a 1 indican mayor vigor y densidad de la vegetación, valores menores que 0.1 el área es usualmente suelo desnudo y cuando los valores exceden a 0.8 el área tiene una alta densidad de la vegetación (Xu *et al*, 2013). Este índice compara la cantidad de luz roja visible absorbida y la luz infrarroja cercana reflejada; ya que la clorofila en una planta sana absorbe la mayor parte de la luz roja visible y la estructura celular refleja la luz infrarroja cercana, una planta saludable tiene alta actividad fotosintética y una vegetación densa esta tendrá menor reflectancia de la banda roja y mayor reflectancia en el infrarrojo cercano (Figura 7).



**Figura 7.** Comparación de reflectancias de un árbol saludable y otro con deficiencias (Elaboración propia).

Este índice se presenta en la siguiente ecuación

$$NDVI = \frac{Band_R - Band_{ICR}}{Band_R + Band_{ICR}}$$

Donde:  $Band_R$  y  $Band_{ICR}$  son las reflectancias a nivel de superficie de las bandas del rojo y del infrarrojo cercano.

## 2.13 ESTUDIOS A FINES EN MATERIA DE EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO

En nuestro país como en otras partes de mundo, los estudios de emisiones de gases efecto invernadero son escasos (Wang *et al*, 2018), ya que en México solo existen seis artículos publicados referentes a emisiones derivadas de los incendios forestales. Los métodos para estimar las emisiones de gases efecto invernadero hacen referencia de acuerdo con los lineamientos del IPCC, otros para el sector agrícola (Saynes- Santillán *et al*, 2016) y para el sector Uso de Suelo, Cambio de Uso y Silvicultura (USCUSS) que incluye categorías que involucran quema de biomasa, entre ellas los incendios forestales (Bueno-Hurtado, *et al*, 2015). Estas metodologías han sido utilizadas por diversos autores para realizar estimaciones de los gases efecto invernadero en usos específicos;(Yerena, 2013; Chávez ,2015; y Bulnes ,2017) donde dichos autores estimaron los gases producidos por los incendios forestales y reportan que el CO<sub>2</sub> es el gas que más aportan los incendios forestales. Otro autor evaluó las emisiones en tierras agrícolas concluyendo que las actividades agropecuarias contribuyen al 12 % del total de las emisiones nacionales (Saynes- Santillán *et al*, 2016). Las emisiones por la quema de biomasa contienen numerosos componentes que son considerados tóxicos o que hacen daño a la salud humana, como el material particulado (PM) (Holder *et al*, 2016); el efecto que tienen los incendios forestales no sólo producen el calentamiento de la atmósfera (Guo *et al*, 2018); también deterioran la calidad del aire y se le ha asociado con efectos negativos sobre la salud humana, básicamente por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, a efectos mutagénicos y a muerte prematura, entre los más importantes (Mota y Wooster 2018).

### 3.0 JUSTIFICACIÓN

Los incendios forestales afectan en México cada año grandes extensiones, estos junto con las plagas y enfermedades son causas de mortalidad de árboles, convirtiéndose a su vez en factores de degradación y deforestación.

Pueden llegar a ser muy destructivos originando pérdidas de vegetación, materia orgánica, calidad del aire, fauna entre otros; además de generar problemas secundarios como: la erosión del suelo, mala infiltración en el suelo, y emisiones de gases de efecto invernadero (Morales *et al*; Malchus, 1998).

La combustión de la vegetación libera grandes cantidades de partículas y gases que tienen un impacto significativo en el medio ambiente; emitiendo gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático, por lo que es importante realizar inventarios de estas emisiones e incluirlas en los inventarios estatales.

## **4.0 HIPÓTESIS**

Existen diferencias en la cantidad de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) emitidas durante los incendios forestales con relación a la densidad y la cobertura vegetal de los ecosistemas afectados.

### **4.1 OBJETIVOS**

#### **4.1.1 General:**

Estimar las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), producidas por los incendios forestales en el periodo 2008-2018 en el sur del estado de Nuevo León.

#### **4.1.2 Específicos:**

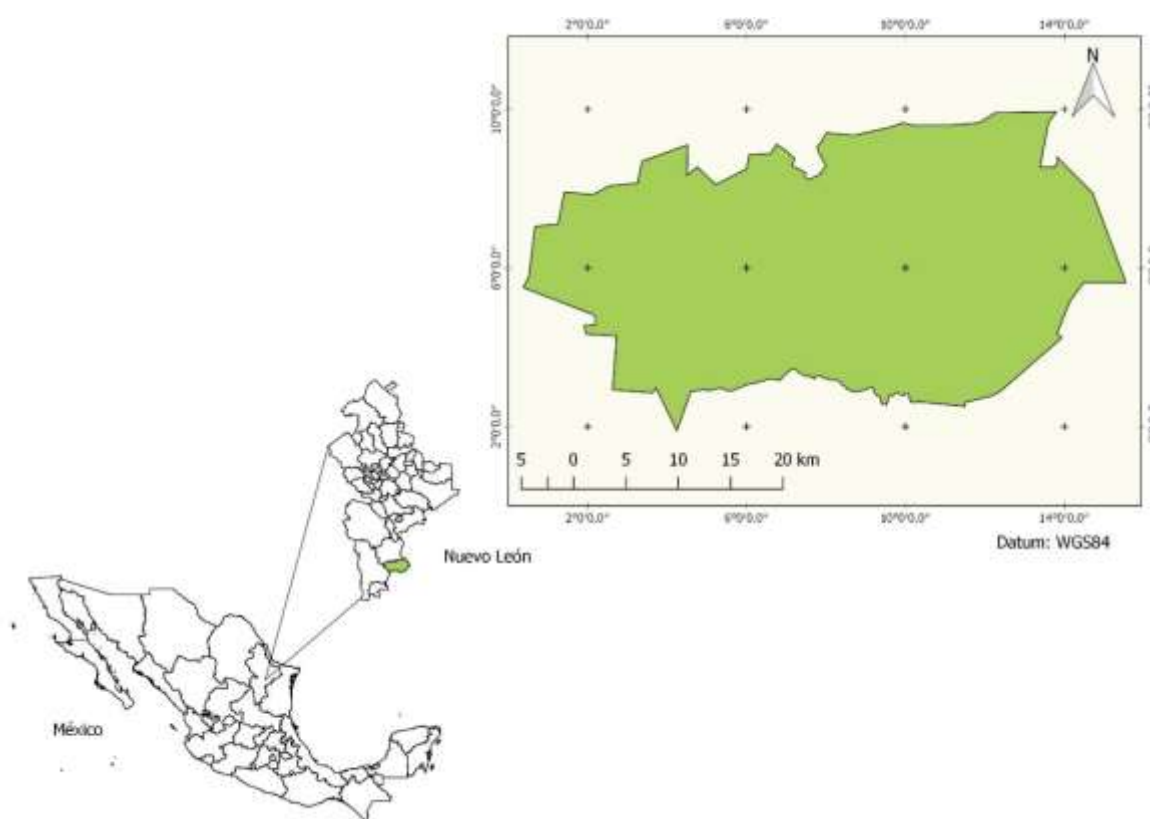
- Determinar los tipos de vegetación y la densidad previa al incendio.
- Detectar las áreas registradas con incendios forestales, cuantificar sus superficies y severidad.
- Estimar la cantidad total de CO<sub>2</sub> liberada durante los incendios en el Sur de Nuevo León.

## 5.0 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Descripción del área de estudio

#### 5.1.1 Localización

El área de estudio se ubica en el municipio de General Zaragoza en la Sierra Madre Oriental, entre las coordenadas 23°58'30" N 99°46'00" W; (Figura 8) con altitudes que van desde 1100 hasta 3,600 msnm, su extensión territorial es de 1,315 km<sup>2</sup> (INEGI, 1986).



**Figura 8.** Localización del área de estudio (Elaboración propia, usando datos del INEGI).



### 5.1.2 Clima

De acuerdo con el sistema de Köppen modificado para México por Enriqueta García (1981) la región de estudio presenta dos tipos de clima; la parte alta del municipio es de tipo C(w2) el cual corresponde a un tipo Templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad. Además de presentarse el clima C(E)(w)(w), el cual corresponde a un clima Semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad. En relación con la temperatura los meses más cálidos son mayo, junio y julio con 20° C, la temperatura media anual oscila entre 8- 20 °C, en invierno los meses más calurosos presentan temperaturas de 6-15° C presentándose en ocasiones nevadas y heladas cercanas a la cabecera municipal y en gran parte de la sierra (Merla, 1990).

### 5.1.3 Geología

La sierra Madre Oriental está compuesta por un amplio espectro de rocas sedimentarias calizas de época mesozoica de jurásico superior, cretácico inferior hasta cretácico superior. El área de estudio se localiza geológicamente en una superficie compuesta por las rocas dominantes calizas con áreas pequeñas de lutitas y mayormente aluvión, las rocas se presentan en capas gruesas las cuales se originaron en cretácico inferior, con un fracturamiento moderado y profundidad somera en su intemperismo; su origen geológico se ubica en la era mesozoica, periodo cretácico inferior que se caracterizó por presentar rocas tipo sedimentarias calizas (INEGI, 2009).

#### 5.1.4 Edafología

Las unidades de suelo predominantes para el municipio de General Zaragoza, de acuerdo con la clasificación de World Reference Base for Soil Resources (IUSS Working Group WRB, 2015) son de tipo leptosol. Este tipo de suelos son muy someros sobre roca continua y extremadamente gravillosos o pedregosos, son muy comunes en áreas de montaña y se correlacionan con los litosoles. También se presentan áreas con tipos de suelo: cambisol, luvisol, calcisol y regosoles.

La topografía del área es muy irregular, presentando áreas planas con pendientes de 4 % hasta zonas abruptas que alcanzan hasta 100 %.

#### 5.1.5 Vegetación

La vegetación de la región está compuesta por bosque natural; los tipos de vegetación predominantes están conformados por asociaciones de pino, pino-encino, seguido por una pequeña población de matorral submontano y de chaparral. Los bosques de coníferas están representados por las especies arbóreas de: *Pinus ayacahuite*, *P. pseudostrobus*, *Pseudotsuga menziesii*, *Abies vejari*, *Picea martinezii*. Estos bosques se localizan en cañones protegidos con climas fríos y húmedos, generalmente entre 2,000 a 2,500 msnm en los municipios de Galeana, Iturbide, Aramberri y Zaragoza (Rzedowski, 1994).

En la parte plana del municipio se encuentran especies como: mezquite, huizache, nopal y plantas arbustivas además de gran variedad de cactus como: biznagas, órganos, magueyes, lechuguilla; en la parte alta se encuentran especies maderables como: encinos, cedro, anacahuita, madroño (INEGI, 2009).

## **6.0 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

### **6.1 Análisis de Imágenes Satelitales**

Para evaluar las áreas incendiadas se utilizaron bases de datos de los incendios e imágenes satelitales Landsat de los sensores: TM (Thematic Mapper) y OLI/TIRS (Operational Land Imager /Thermal Infrared Sensor), ambas con una resolución espacial de 30 metros. Las imágenes satelitales se encuentran en la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) Zona 14 N Datum WGS84.

Para evaluar los cambios en la vegetación a través del tiempo se utilizó el continuo nacional de Uso del Suelo y Vegetación Series IV, V y VI escala 1:250,000.

Se emplearon dos imágenes satelitales por año de orbita/imagen 27/43 y 27/44 tomadas desde los satélites Landsat 5 y Landsat 8 en los años 2008 al 2018; estas se descargaron del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos).

#### **6.1.2 Procesamiento de las imágenes satelitales**

El procesamiento digital de las imágenes se realizó mediante el programa Quantum Gis. Se aplicó la corrección atmosférica la cual tiene como objetivo, corregir el efecto de la dispersión de energía electromagnética de las partículas de agua suspendidas en la atmósfera; permitiendo de esta manera restar a la imagen los valores que estas agregan a los datos de la imagen, se utilizó el método DOS1 (Dark Object Subtraction) o también conocido como método de Chávez.

Posteriormente de corregir atmosféricamente las 20 imágenes satelitales se realizó la unión de las bandas multiespectrales de cada imagen. En el caso de Landsat 5 y Landsat 8, las cuales cuentan con 7 y 11 bandas respectivamente.

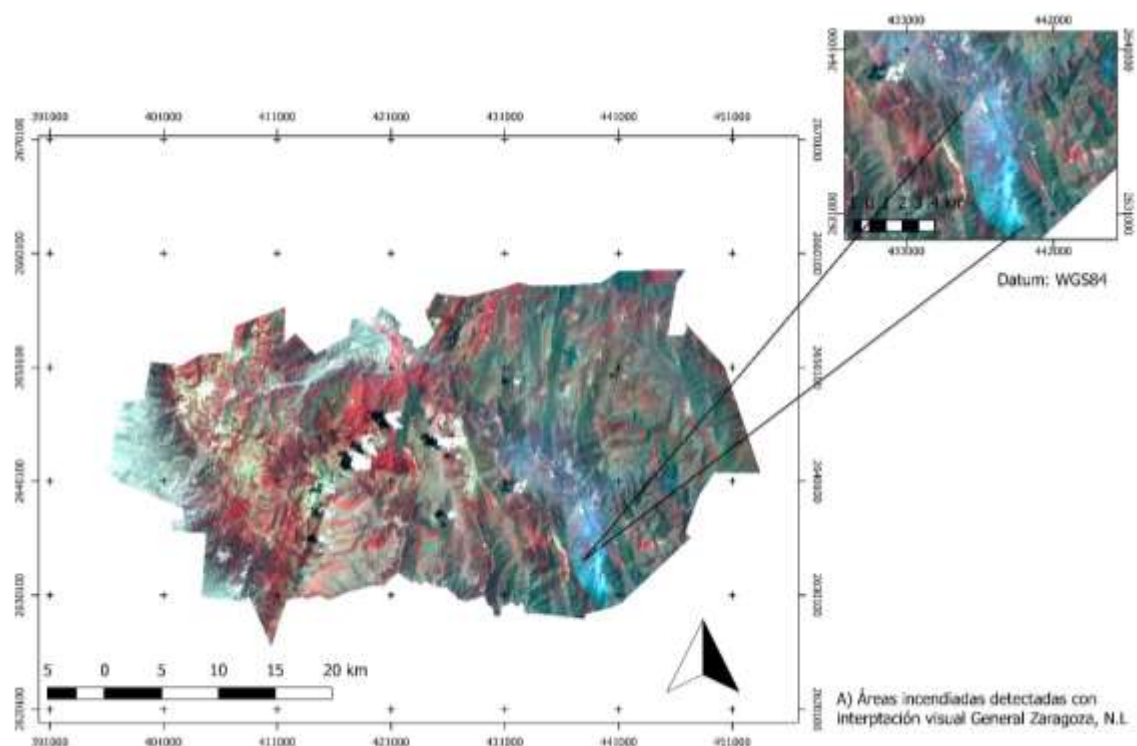
### 6.1.3 Aplicación de Índices Multiespectrales

Se calculó el Índice Normalizado de Áreas Incendiadas (NBR), para todas las imágenes satelitales, sin embargo, el tipo Landsat 5 y 8 difieren por su número de bandas multiespectrales, por lo cual al aplicar la fórmula cambia el número de banda para el sensor ETM instalado en el satélite Landsat 5 la banda del rojo es la 4, el infrarrojo de onda corta es la banda 5 en cambio para el sensor OLI instalado en el satélite Landsat 8 las bandas son la 5 y la 6 respectivamente como se muestra en la siguiente tabla 2.

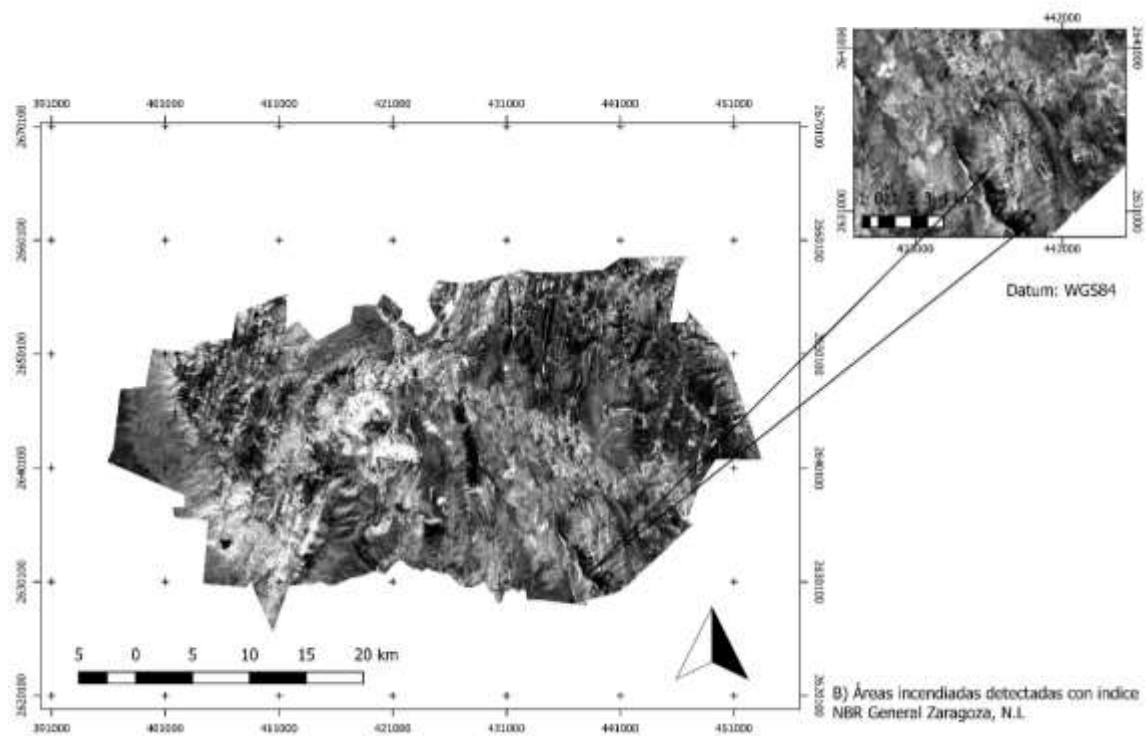
**Tabla 2.** Bandas espectrales en Landsat 5 y 8 para la aplicación de índice de áreas incendiadas.

Landsat 5		Landsat 8	
Band <sub>IR</sub>	4	Band <sub>IR</sub>	5
Band <sub>SWIR</sub>	5	Band <sub>SWIR</sub>	6

Para detectar las áreas incendiadas, se realizó interpretación visual, al combinar las bandas multiespectrales en el siguiente orden: R/G/B (Red, Green, and Blue), se detectaron elementos habituales como el humo en incendios activos; se aplicó el Índice Normalizado de Áreas Incendiadas (NBR) para todas las imágenes satelitales 2008-2018, resultando con altos valores de nitidez las áreas incendiadas (Figura 9 y 10).



**Figura 9.A)** Interpretación visual de áreas incendiadas año 2011.



**Figura 10. B)** Áreas detectadas con índice NBR año 2011.

Se aplicaron algunas modificaciones de este índice a las imágenes satelitales como: delta relativo de área quemada y la relación de combustión relativizada los cuales se presentan sus fórmulas a continuación. Así como también se calculó la severidad de los incendios se utilizaron imágenes previas y posteriores al incendio y se clasificaron con base en la relación del índice  $\Delta NBR$  y la severidad propuesto por (Key y Benson, 1999) Tabla 3.

### 1. Severidad del Incendio

$$\Delta NBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

### 2. Delta Relativo de Área Quemada

$$R\Delta NBR = \frac{NBR_{pre} - NBR_{post}}{\sqrt{\frac{NBR}{1000}}}$$

**Tabla 3.** Relación del índice  $\Delta NBR$  y la severidad (Key y Benson, 1999).

NBR	Severidad Incendio
<-0.25	Alto repoblamiento
-0.25 a -0.1	Bajo repoblamiento
-0.1 a 0.1	Sin quemar
0.1 a 0.27	Baja severidad
0.27 a 0.44	Moderada severidad
0.44 a 0.66	Moderada- Alta severidad
>0.66	Alta severidad

### 3. Relación de Combustión Relativizada

$$RBR = \frac{\Delta NBR}{NBR_{pre} + 1001}$$

Las áreas incendiadas fueron digitalizadas por año, utilizando la interpretación visual, índice NBR, y relación de  $\Delta NBR$ , se utilizó el continuo nacional de Uso de Suelo y Vegetación Serie IV, V, VI escala 1: 250,000 para determinar los tipos de vegetación afectados. Se verificaron varias áreas con severidad moderada de incendios en el Ejido Tepozanes, para esta verificación se utilizó: GPS, binoculares y cámara fotográfica. En el recorrido en campo se detectó que efectivamente son áreas incendiadas, presentan algunos ejemplares del género *Pinus* y *Populus*.

Se calculó el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), para todas las imágenes satelitales, sin embargo, el tipo Landsat 5 y 8 difieren por su número de bandas multiespectrales, por lo cual al aplicar la fórmula cambia el número de banda para Landsat 5 la banda del rojo es la 3, el infrarrojo de onda corta es la banda 4 en cambio para Landsat 8 las bandas son la 4 y la 5 respectivamente como se muestra en la siguiente tabla 4.

**Tabla 4.** Bandas espectrales en Landsat 5 y 8 para la aplicación de índice de vegetación normalizada.

Landsat 5		Landsat 8	
<b>Band<sub>R</sub></b>	3	<b>Band<sub>R</sub></b>	4
<b>Band<sub>ICR</sub></b>	4	<b>Band<sub>ICR</sub></b>	5

Para las imágenes satelitales que aplicamos el índice de vegetación normalizada (NDVI) realizamos una clasificación de imágenes. La clasificación es un componente primordial en el análisis de las imágenes satelitales ya que nos permite el reconocimiento de patrones y es una forma de extraer información de estas. Se realizó una clasificación supervisada, la cual nos permite usar algoritmos para etiquetar pixeles que representen cada tipo de cobertura, de esta manera los pixeles forman campos de entrenamiento que sirven para entrenar el ordenador para que pueda reconocer las distintas categorías establecidas. El algoritmo que se utilizó es el de mínima distancia, el cual clasifica el píxel en la categoría más cercana a él. Las clases seleccionadas se determinaron en relación con los resultados de este índice y se presentan a continuación en la tabla 5.

**Tabla 5.** Macro clases establecidas para la clasificación supervisada.

Macro clases	Tipo Cobertura
1	Sin Vegetación Aparente
2	Baja
3	Media
4	Alta

La detección de cambios de esta investigación comprendió dos periodos, se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6.**Periodos evaluados.

Período	Duración
1	2008-2013
2	2013-2018

El cambio de la cobertura se comparó con las clasificaciones previamente realizadas para cada uno de los periodos, se calculó el número de pixeles que cambian de una clase a otra utilizando las herramientas del programa Quantum Gis. El cambio de uso de suelo se determinó mediante el continuo nacional de Uso del Suelo y Vegetación Serie IV, V y VI escala 1: 250,000, el procedimiento se realizó en el programa Quantum Gis y Jupyter.

## 6.2 Cálculos de las Emisiones de Gases Efecto Invernadero

Con el fin de cuantificar las emisiones de los gases efecto invernadero (GEI) se utilizó la metodología recomendada por las directrices para inventarios nacionales de gases efecto invernadero IPCC.

Se calcula con la siguiente formula:

$$L_{fuego} = A * M_B * C_F * G_{ef} * 10^{-3}$$

Dónde:  $L_{fuego}$  es la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero debido a los incendios forestales (Mg); A es la superficie quemada (ha),  $M_B$  la masa de combustible disponible (Mg/ha),  $C_f$  el factor de consumo de combustible, y  $G_{ef}$  el factor de emisión (g/kg) de materia seca quemada.

La masa del combustible  $M_B$  incluye biomasa aérea, hojarasca y madera muerta, varía en función al tipo de vegetación, la cual se definió por literatura: bosque de encino-pino (biomasa aérea, renuevos, hojarasca), bosque de encino (biomasa aérea), Matorral submontano (biomasa aérea, hojarasca), Matorral desértico (biomasa aérea) y pastizales. (Tabla 7).



**Tabla 7.** Biomasa por tipo de vegetación (IPCC, 2013).

Tipo de Vegetación	Componente	Biomasa Mg ha <sup>-1</sup>
Bosque de encino-pino	Biomasa aérea	132.85
	Renuevos	0.75
	Hojarasca	19.93
Bosque de encino	Biomasa aérea	99.24
Matorral submontano	Biomasa aérea	44.40
	Hojarasca	7.40
Matorral desértico	Biomasa aérea	5.2
Pastizal	Biomasa aérea	0.45

El factor de consumo  $C_f$  es una medida de la proporción del combustible que realmente se quema, varía en función del tamaño y disposición de la carga de combustibles (Tabla 8).

**Tabla 8.** Factor de consumo  $C_f$  por tipo de vegetación (IPCC,2013.)

Vegetación	Factor de Consumo $C_f$
Bosque encino-pino, bosque encino	0.45
Matorral submontano, matorral desértico	0.72
Pastizales	0.74

El factor de emisión  $G_{ef}$  aporta la cantidad por cada gas de efecto invernadero emitido por unidad de material seco quemado, este factor varía en función del contenido de cada GEI y el grado de combustión (Tabla 9). Estos factores se obtuvieron de las directrices para los inventarios de gases efecto invernadero del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (valores por defecto).

**Tabla 9.** Factor de emisión Gef por tipo de gas de efecto invernadero (IPCC,2013).

Vegetación	Factor de emisión g kg <sup>-1</sup> de materia seca				
	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>
Bosque encino-pino, Bosque encino	1569	107	4.7	0.26	3.0
Matorral submontano, Matorral desértico y pastizales	1613	65	2.3	0.21	3.9

En las directrices para los inventarios de gases efecto invernadero se presentan métodos de cálculo con niveles de complejidad y calidad de resultados; sin embargo, el uso de uno u otro dependerá de la información y recursos disponibles para esta actividad del país. La información “por defecto” se considera si no se tienen coeficientes propios del lugar para facilitar la cuantificación de las emisiones. Es importante mencionar que no se considera el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> en incendios de pastizales ya que se asume que las emisiones de CO<sub>2</sub> se compensaran con las absorciones de CO<sub>2</sub> producidas por la subsiguiente regeneración dentro del lapso de un año; en este caso no se estimó para los pastizales el dióxido de carbono.

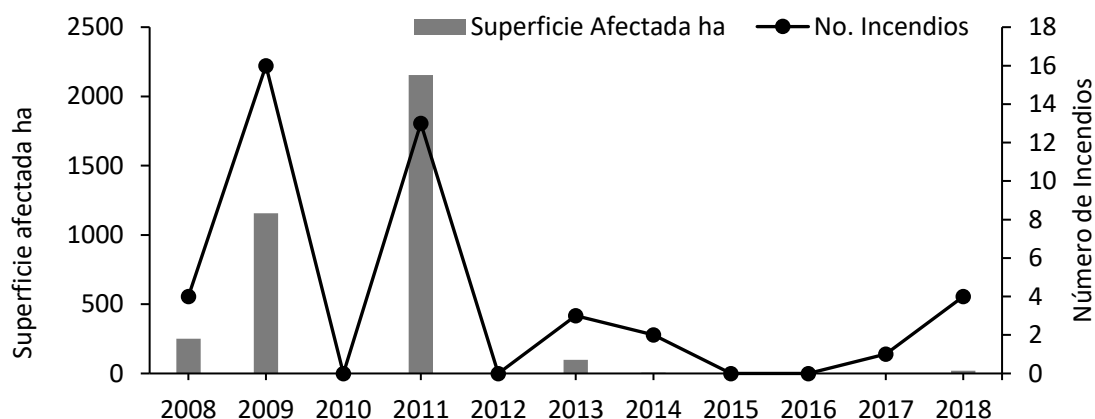
En estas directrices se proporciona un enfoque exhaustivo para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> para los siguientes tipos de incendios: (1) de pastizales, (2) quema de residuos agrícolas, (3) quema de hojarasca, sotobosque y residuos de cosechas en tierras forestales, (4) quema posterior al desmonte forestal y la conversión de agricultura, (5) otros tipos de quema. Además de las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de la combustión, los incendios pueden llevar a la creación de una existencia de carbón inerte (carbón vegetal) ya que los residuos producidos por el fuego incluyen componentes no quemados y parcialmente quemados, así como también una pequeña proporción de carbón vegetal que debido a su naturaleza química es resistente a la descomposición.

## 7.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados de emisiones por año, por tipo de vegetación y por gas efecto invernadero para el periodo de 2008-2018; también se presentan los resultados de los cambios en la vegetación con base al índice NDVI y los continuos de vegetación series IV a la VI.

### 7.0.1 Emisiones de GEI producidas por Incendios

El número de incendios evaluados en el periodo de 2008-2018, para el municipio de General Zaragoza, N.L fue de 43 y afectaron una superficie de 3,687.1 ha. El mayor número de incendios fue en 2009 con 16; sin embargo, no está relacionado con la superficie afectada, ya que esta presentó la mayor afectación en 2011 con 13 incendios y consumió 2154.5 ha, así como también hubo años que no se reportaron incendios como: 2010, 2012, 2015 y 2016 (Figura 11).



**Figura 11.**Incendios para periodo 2008-2018 Zaragoza, N.L.

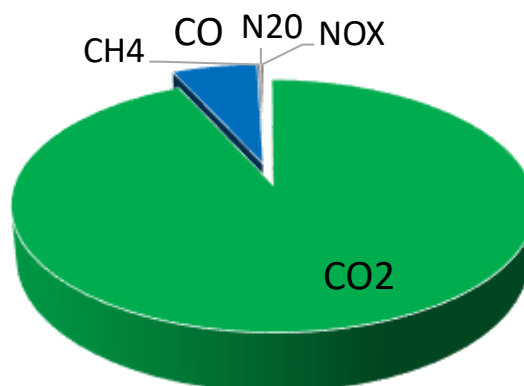
Los tipos de vegetación afectados son: con un 49.80% los bosques de encino, seguido con un 40.87% de los bosques de encino-pino, seguido por el matorral micrófilo con 6.16%, matorral submontano 1.48%, matorral desértico 1.06% y el pastizal natural e inducido con 0.63%, sus componentes afectados en su mayoría son la biomasa aérea, renuevos y en los bosques de encino-pino la hojarasca.

Las emisiones de los gases efecto invernadero consideradas en el periodo evaluado totalizaron 290,132.82 Mg; los años con mayores emisiones fueron los de mayor superficie afectada siendo en 2011 con 171,872.45 Mg, seguido de 2009 con 112,872.37 Mg, 2013 con 3,006.41 Mg y 2008 con 2,100.12 Mg. El gas que más se emitió durante los incendios forestales en todos los años de este periodo fue el CO<sub>2</sub> lo cual coincide con la literatura, el total de emisiones de este gas fue de 270,453.67 Mg. Continúan las emisiones de CO, con un total de 18,312.52 Mg, el gas que menos se emitió fue el N<sub>2</sub>O con un total de 44.64 Mg en este periodo (Tabla 10).

**Tabla 10.** Emisiones por gas de efecto invernadero.

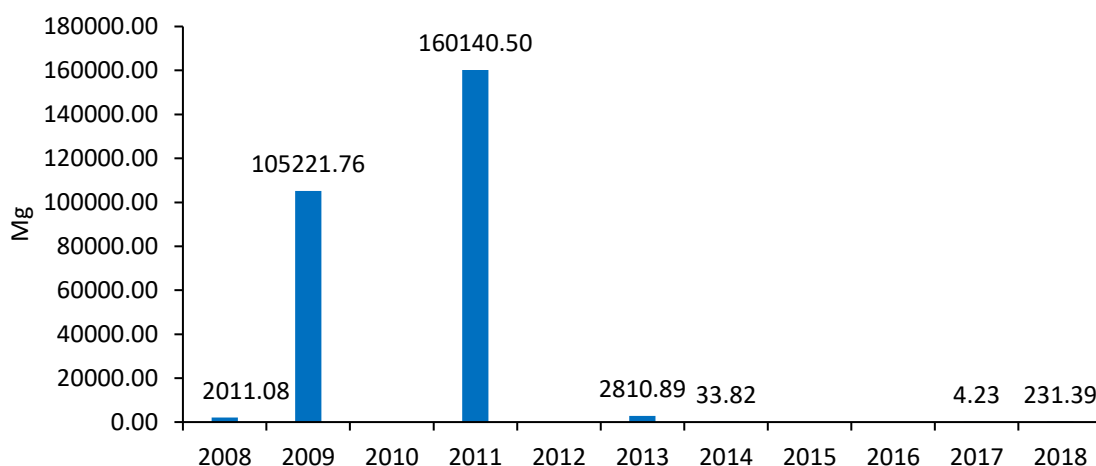
<b>Año</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>TOTAL</b>
2008	2,011.08	81.06	2.87	0.26	4.86	2,100.12
2009	105,221.76	7,119.01	312.00	17.36	202.22	112,872.37
2010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2011	160,140.50	10,919.57	479.63	26.53	306.22	171,872.45
2012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2013	2,810.89	181.93	7.97	0.44	5.17	3,006.41
2014	33.82	1.37	0.05	0.00	0.08	35.33
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2016	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2017	4.23	0.18	0.01	0.00	0.01	4.42
2018	231.39	9.40	0.33	0.03	0.56	241.72
<b>TOTAL</b>	<b>270,453.67</b>	<b>18,312.52</b>	<b>802.86</b>	<b>44.64</b>	<b>519.14</b>	<b>290,132.82</b>

El 99.8% de las emisiones corresponden a compuestos con carbono, que contribuyen al efecto invernadero con superioridad de CO<sub>2</sub> (93.2%) (Figura 12).



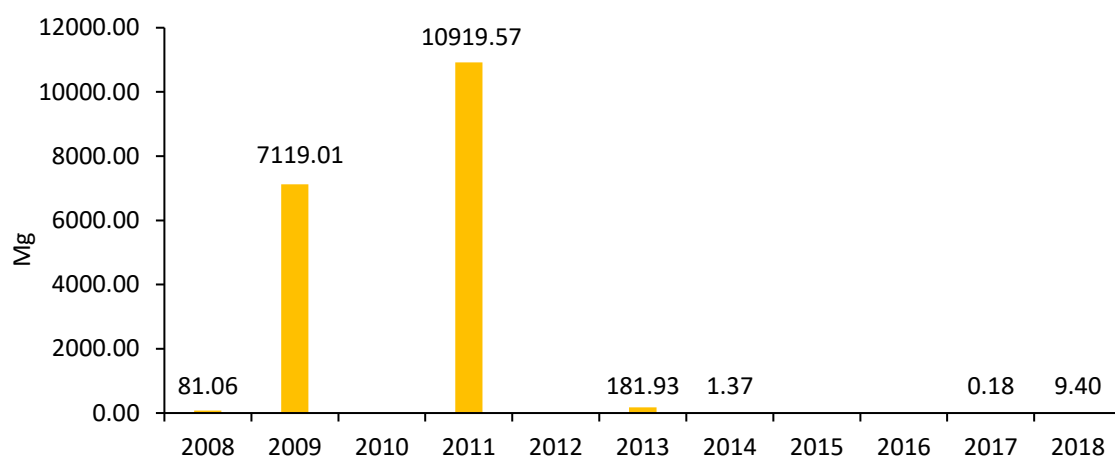
**Figura 12.** Porcentaje de Emisiones de Gases Efecto Invernadero.

A continuación, se presentan las emisiones de cada gas efecto invernadero por año. El gas que más se emitió fue dióxido de carbono con un total de 270,453 Mg, sus valores oscilan de 4.23 a 160,140.50 Mg siendo el año de 2011 el que presentó mayores emisiones (Figura 13).



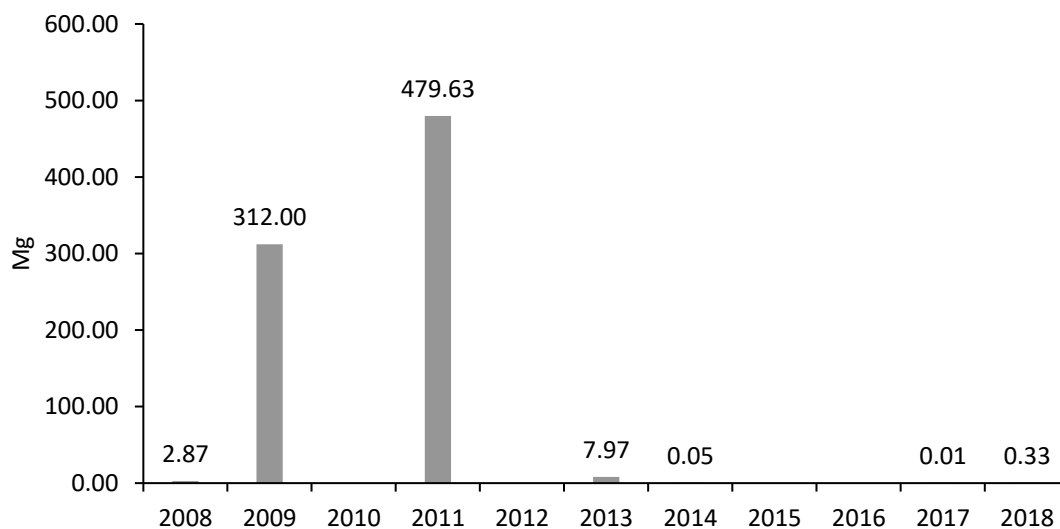
**Figura 13.** Emisiones de Dióxido de carbono por año.

El segundo gas que más se emitió fue el monóxido de carbono con un total de 18,312 Mg sus valores oscilan de 0.18 a 10,919.57 Mg (Figura 14).



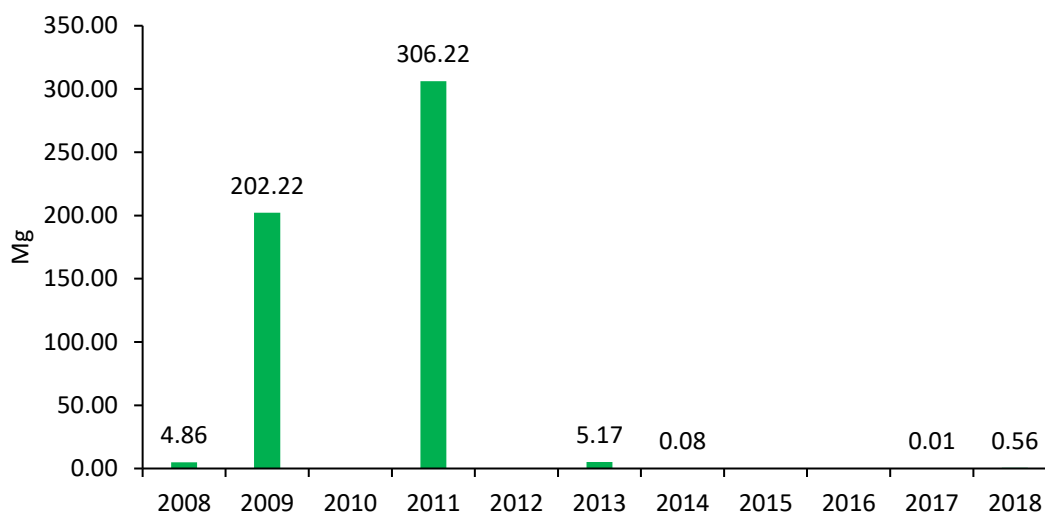
**Figura 14.**Emisiones de Monóxido de carbono por año.

El metano es el tercer gas con mayores emisiones con un total de 802 Mg sus valores oscilan de 0.01 a 479.63 Mg (Figura 15).



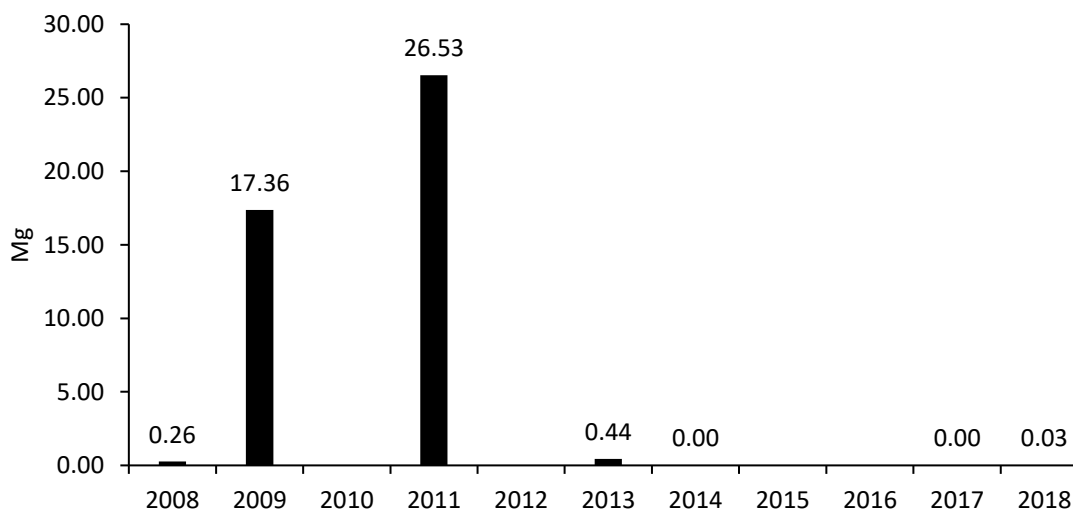
**Figura 15.**Emisiones de Metano por año.

El óxido de nitrógeno es el cuarto gas con mayores emisiones con un total de 519 Mg sus valores oscilan de 0.01 a 306.22 Mg (Figura 16).



**Figura 16.** Emisiones de Óxido de nitrógeno por año.

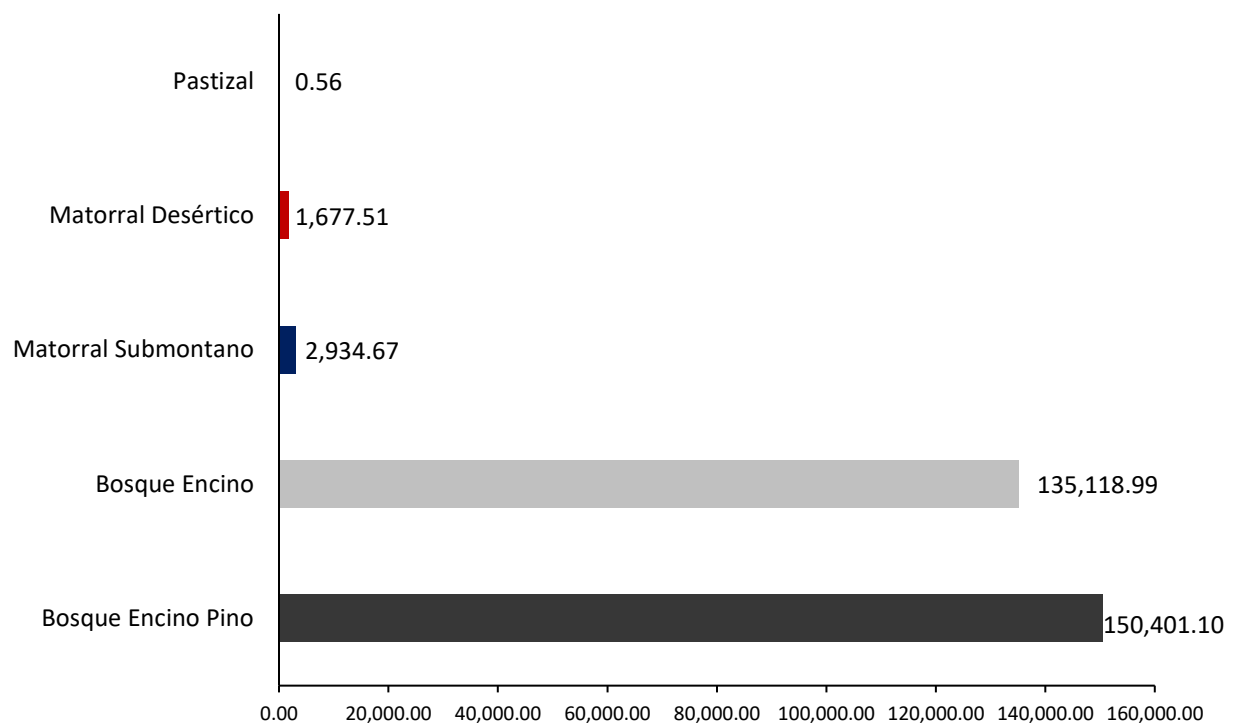
El gas de efecto invernadero que menos se emitió fue el óxido nitroso con un total de 44.6 Mg sus valores oscilan de 0.03 a 26.53 Mg (Figura 17).



**Figura 17.** Emisiones de Óxido nitroso por año.

El inventario de emisiones realizado para los incendios forestales en la Corona Regional de la Ciudad de México (CRCD) de 2003-2014 muestra que el año 2011 presenta más emisiones de CO<sub>2</sub> con un total de 194,046 Mg y las coberturas con mayor afectación son los pastizales, arbustos y matorrales (Bulnes,2017). Lo cual concuerda con nuestros resultados ya que el año de mayor emisión fue 2011 con 171,872.45 Mg; podemos concluir que los años con mayor GEI fueron los de mayor superficie afectada por incendios.

Las emisiones de gases efecto invernadero por tipo de vegetación fueron mayores en bosque de encino-pino con 150,401.10 Mg, seguidas por el bosque de encino con 135,118.99 Mg, matorral submontano con 2934.67 Mg, matorral desértico con 1677.51 Mg y finalmente los pastizales con 0.56 Mg (Figura 18).



**Figura 18.**Emisiones de Gases Efecto Invernadero por tipos de Vegetación.

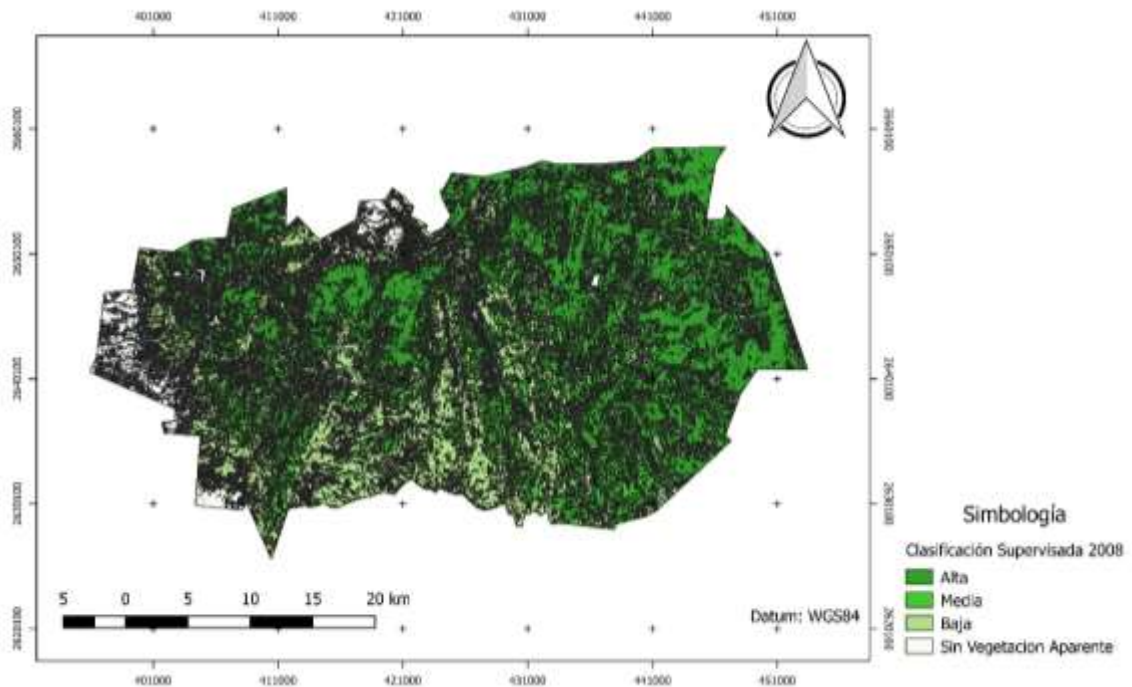


Los datos de CONAFOR (2015-2018) agrupados por Uso de Suelo y Vegetación (USV) muestran que el bosque de coníferas y bosque de encino representan los tipos de vegetación con mayor número de incendios, superficie y emisiones; estos tipos de vegetación representan el 56% de los incendios, 61% de la superficie afectada y el 59% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Sin embargo, Ben de Jong (2009) menciona que los tipos de vegetación que emitieron mayores cantidades de gases durante el periodo de (1990-2006) fueron los pastizales y matorrales, los tipos de vegetación que emitieron menos fueron los bosques latifoliados y la selva mediana y alta. Por lo cual nosotros reportamos que son otros tipos de vegetación los que más emiten (Bosque de encino-pino, y Bosque de encino) esto se debe al acelerado cambio de uso de suelo provocado por las prácticas específicas de manejo o por las fuerzas políticas, sociales y económicas que controlaban esos usos del suelo en esos años (Bocco *et al*, 2001). En el programa de acción ante el cambio climático en el estado de Chiapas del periodo de (2005-2008) los pastizales, selva alta y mediana, vegetación secundaria y bosques de coníferas son los que mayormente contribuyen a las emisiones de GEI con un 72.82 %, el gas que más se emitió fue el CO<sub>2</sub> con 9,112 Gg y CO con 983 Gg (De Jong *et al*, 2010). En los años del (2010-2013) se emitieron en total 47,715.23 Gg de CO<sub>2</sub> de acuerdo con el reporte del INECC (2015), en este trabajo nosotros reportamos para el periodo 2008-2018 un total de 290.13 Gg de CO<sub>2</sub> solo para el municipio de General Zaragoza, Nuevo León. Yerena (2013) reporta que la vegetación con mayores emisiones de gases de efecto invernadero fue el bosque de encino-pino con 221,943.20 Mg, seguidas del matorral submontano con 74,916.06 Mg y los que emiten menos son los pastizales con 4.51 Mg; lo cual concuerda con nuestra investigación ya que las mayores emisiones se presentaron en el tipo de vegetación de encino-pino con 150,401.10 Mg, seguidas por el bosque de encino con 135,118.99 Mg y finalmente los pastizales con 0.56 Mg.

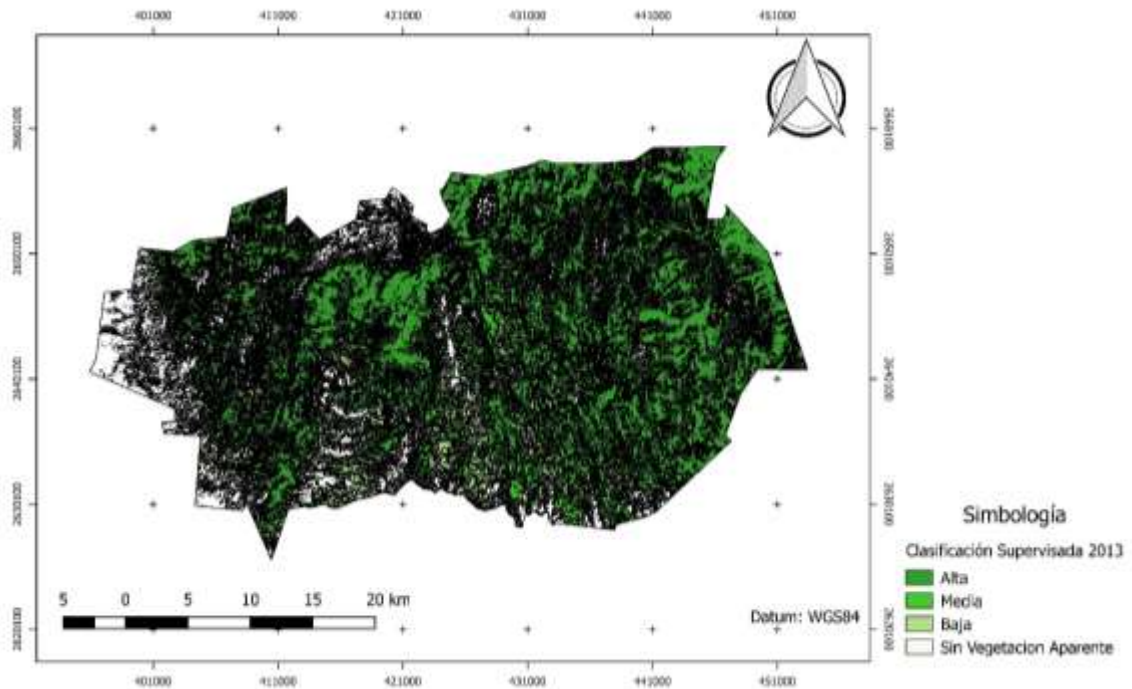
### 7.0.2 Detección de Cambios de Cobertura

En las Figuras 19, 20 y 21 se muestran los mapas de clasificación de cobertura del área de estudio correspondiente a los años 2008, 2013 y 2018 en los cuales se muestran en color blanco las áreas sin vegetación aparente, color verde claro coberturas bajas y medias y en tono verde fuerte las áreas con mayor cobertura.

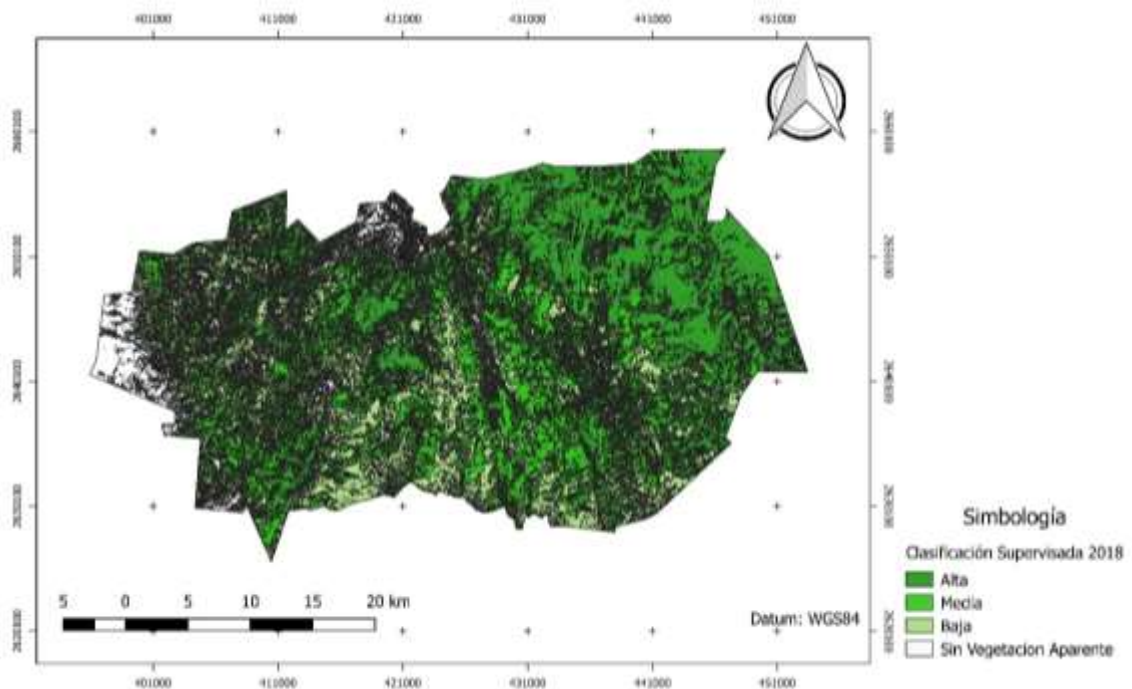
Sin embargo, al comparar las imágenes se observa que lo mayores cambios se localizan en la parte alta y baja del municipio de General Zaragoza. La imagen del año 2018 presenta mayor superficie clasificada con cobertura media respecto a la imagen de 2008.



**Figura 19.** Clasificación Supervisada para el año 2008.

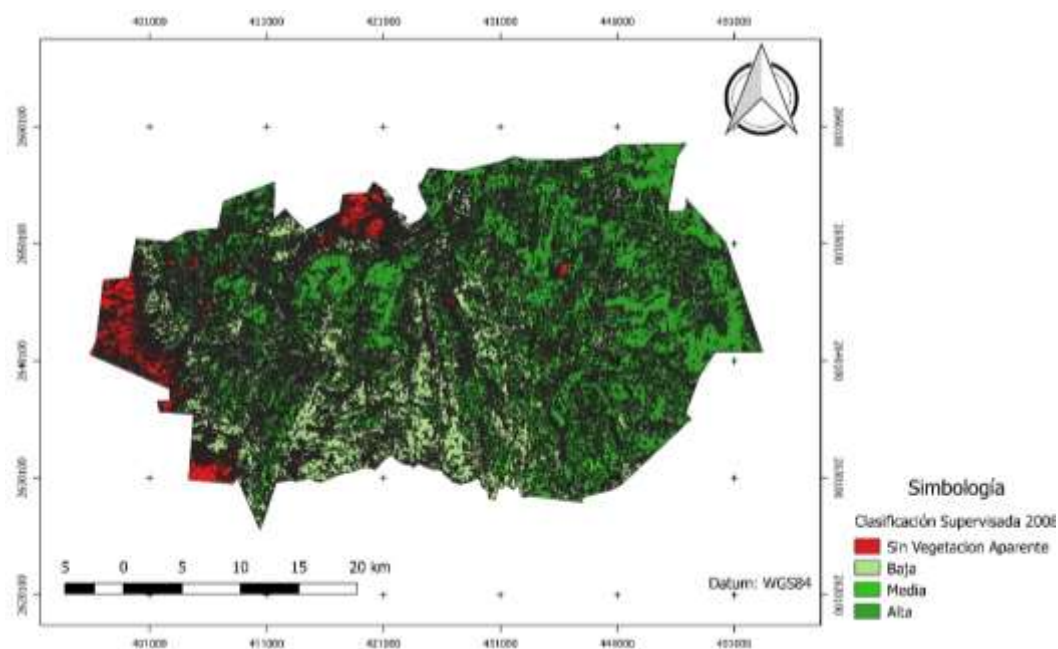


**Figura 20.**Clasificación Supervisada para el año 2013.

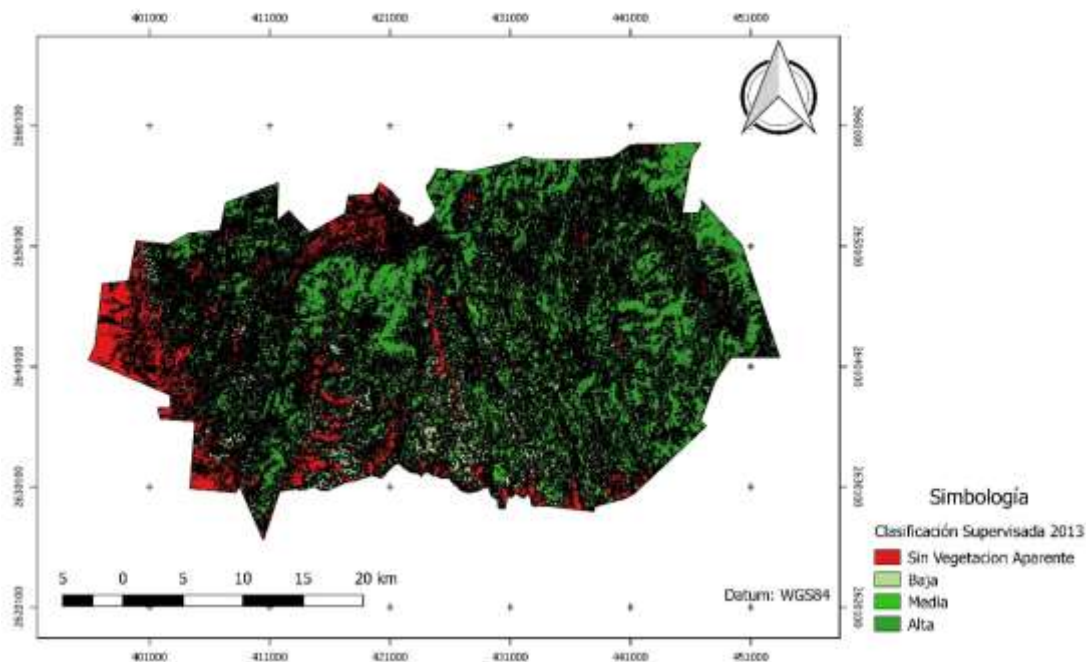


**Figura 21.**Clasificación Supervisada para el año 2018.

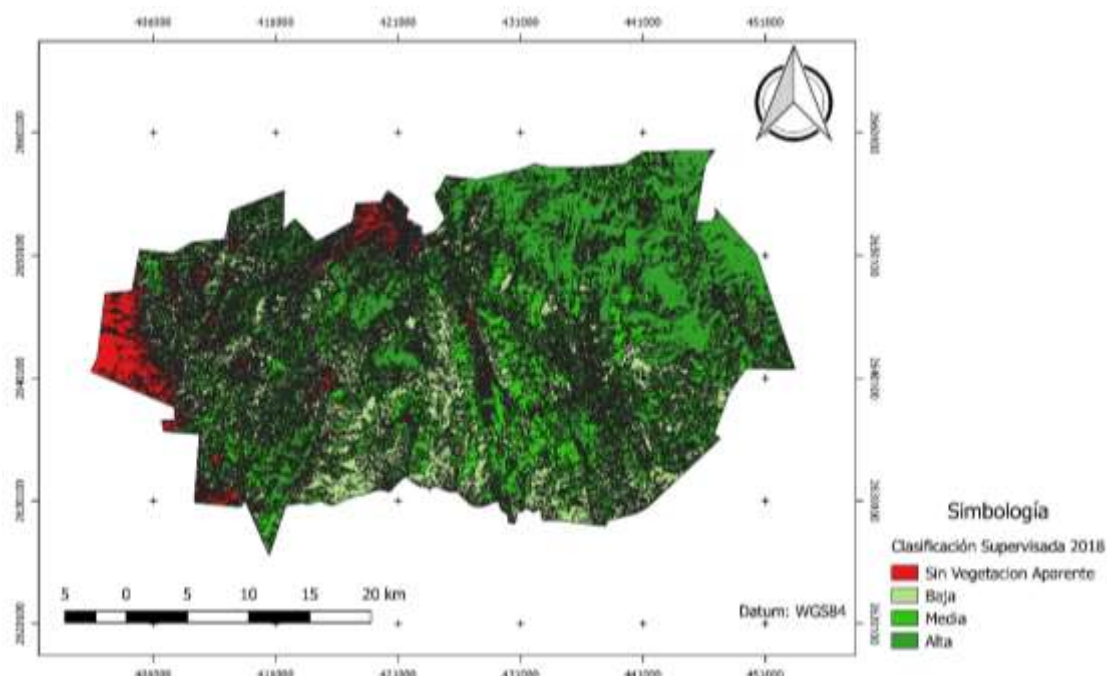
En las Figuras 22,23 y 24 se presentan los resultados del NDVI correspondiente a los años: 2008, 2013 y 2018.



**Figura 22.** Resultados del NDVI año 2008.



**Figura 23.** Resultados del NDVI año 2013.



**Figura 24.**Resultados del NDVI año 2018.

Se pueden observar en color rojo las áreas que presentaron los valores más bajos es decir sin cobertura aparente y en los demás tonos de verde aquellas que presentan algún tipo de cobertura ya sea alta, media o baja.

Las áreas clasificadas dentro de la clase sin vegetación aparente pasaron de ocupar el 9.37% en el año base (2008) a un 15.79% para el año 2013 sin embargo para el 2018 disminuye a 7.7 % (Tabla 11).

Las clases de coberturas baja y media son las que presentaron un aumento en sus superficies; la clase baja presentó 29.66% en 2008 sin embargo en 2011 disminuye su superficie a un 21.96% y en 2018 se recupera a un 29.11 %. Para el caso de la clase media fue la que presentó el mayor aumento ya que en el año de 2008 tenía el 30.34%, para el 2013 disminuye su superficie a 29.33% y en 2018 aumentó significativamente a 35.18% (Tabla 11, Figura 19,20 y 21).

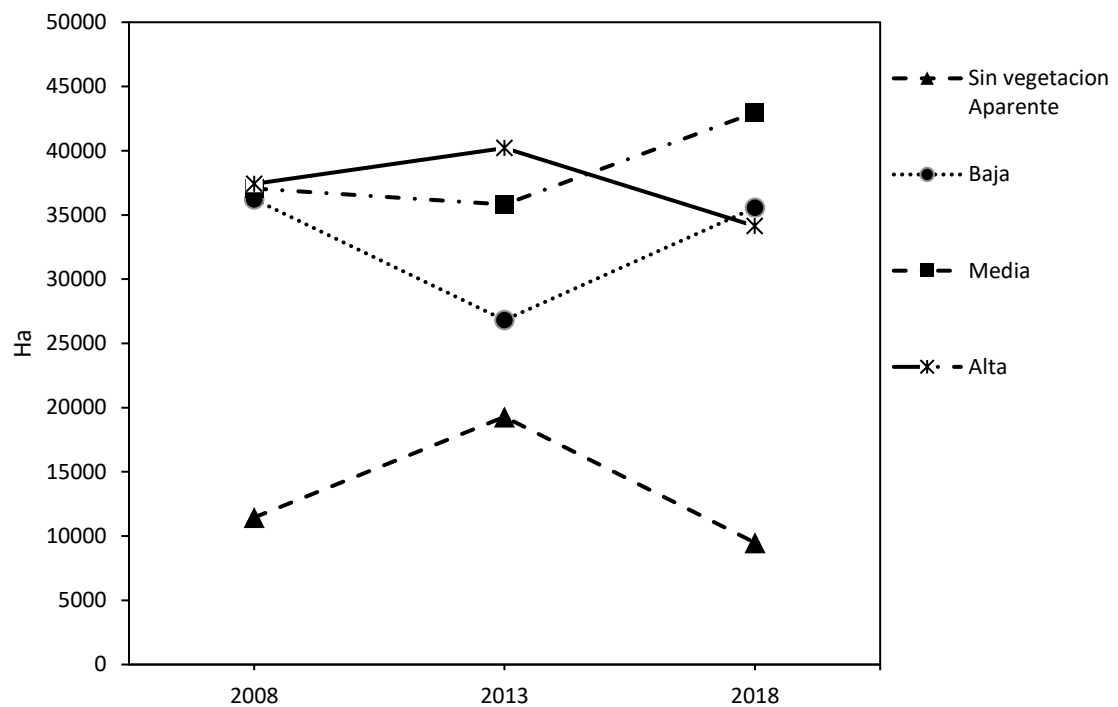
Por último, la clase de cobertura alta presentó una disminución en su superficie del año base al 2018, pasando de una superficie de 30.64 % en 2008 a un 27.95 % en 2018 (tabla 11). El 75% de la deforestación del país se concentra en las regiones noreste que incluye los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas; región noroeste en Durango, Sinaloa, Chihuahua, Sonora, Baja California Sur y Baja California, región sureste que abarca los estados de Tabasco, Campeche, Quintana Roo y Yucatán; mientras que el 25% restante lo ocupan las regiones del occidente y centro del país. En el Estado de Nuevo León, el cambio de uso de suelo es uno de los factores críticos que afectan la sustentabilidad de los recursos naturales ya que se estima que, de la superficie forestal total de 2,708,104 ha se deforestan 16,010 ha /año con una tasa de deforestación de 0.6% anual (Céspedes y Moreno, 2010).

**Tabla 11.** Número de hectáreas por clase y porcentaje del número de hectáreas con respecto al total de ha para los distintos años.

Tipo Cobertura	2008		2013		2018	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
<b>Sin Vegetación Aparente</b>	11,442.29	9.37	19,280.00	15.79	9,486.15	7.77
<b>Baja</b>	36,218.15	29.66	26,809.80	21.96	35,549.26	29.11
<b>Media</b>	37,050.05	30.34	35,811.90	29.33	42,962.99	35.18
<b>Alta</b>	37,417.67	30.64	40,206.10	32.93	34,129.60	27.95

La Tabla 11 muestra los resultados de la implementación del proceso de detección de cambios en las coberturas para los diferentes periodos evaluados. Se observa para el periodo de 2008 -2018 un 4.84 % paso de estar en la clase de cobertura media a alta, siendo este el cambio más alto (Figura 25).

Para el 2008-2013 un 6.42% aumentó las áreas sin cobertura vegetal, lo cual se aprecia claramente en los resultados del NDVI (Figura 19, 20 y 21). La clase de cobertura alta en este periodo aumentó en 2.29%. De 2013-2018 disminuye en un 8.02% la clase sin vegetación aparente, la vegetación baja aumenta en 7.15% y los tipos de coberturas media y alta disminuyen en 5.85% y 4.98% respectivamente (Figura 25).



**Figura 25.** Comportamiento de las clases a través del periodo de estudio.



### 7.0.3 Detección de Cambios en base a las Series de Uso de Suelo y Vegetación

En la tabla 12 se muestran los cambios en la superficie de los diferentes usos de suelo para el municipio de General Zaragoza, donde las áreas de pastizal aumentaron un 0.02 %, así como también las áreas con vegetación secundaria aumentaron un 0.01%; sin embargo, las áreas de matorral, áreas agrícolas y la zona urbana mantuvieron sus superficies; las áreas boscosas presentaron una disminución en un 0.03 % de su superficie (Tabla 12).

La tasa de pérdida anual neta del área de bosque ha descendido del 0.18% en el periodo de 1990-2000 al 0.08% en el periodo de 2010-2015 a nivel mundial, esto se debe a la conversión de bosques a tierras agrícolas. Sin embargo, las series de uso de suelo y vegetación señalan que la superficie agrícola ha ido en aumento en todo el país, Nuevo León aumentó su superficie agrícola un 0.8% (FAO,2015). Estos datos concuerdan con esta investigación ya que las áreas agrícolas y pastizales han ido en aumento, las áreas boscosas han disminuido significativamente, y han aumentado las áreas con vegetación secundaria.

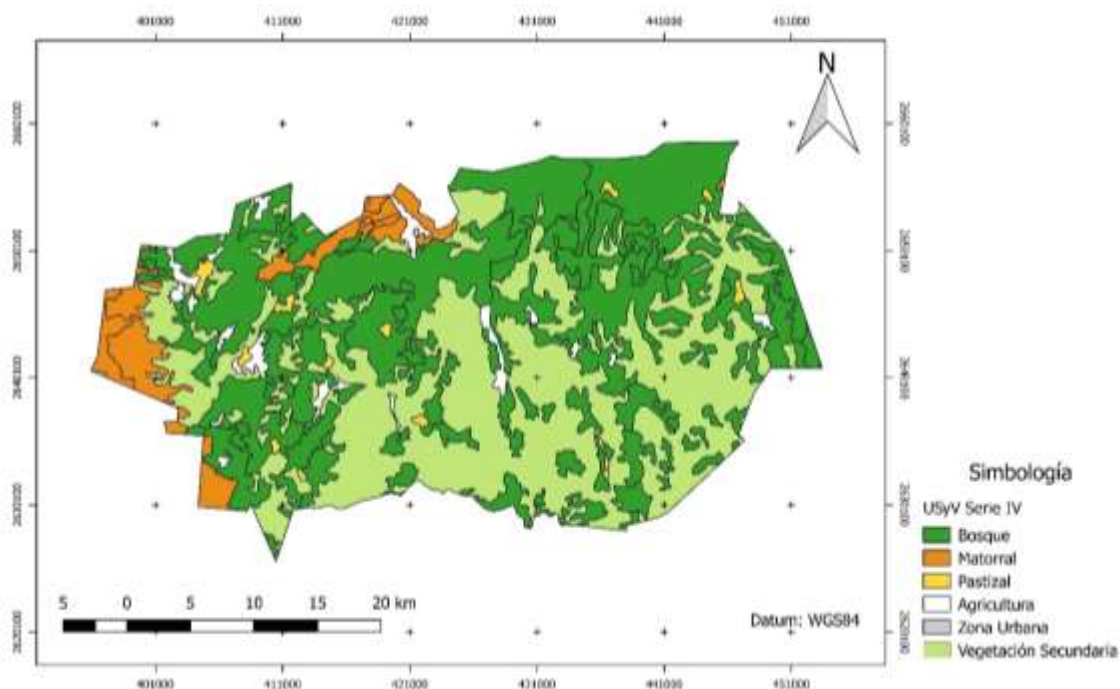
**Tabla 12.** Cambios en el uso de suelo y vegetación en base a las cartas de INEGI.

Tipo Vegetación	Serie IV		Serie V		Serie VI		Cambio de la Serie IV-VI
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha
<b>Bosque</b>	67159	50.05	67116	50.02	67116	50.02	43
<b>Matorral</b>	8137	6.06	8137	6.06	8137	6.06	0
<b>Pastizal</b>	1311	0.98	1336	1.00	1336	1.00	25
<b>Agricultura</b>	3210	2.39	3203	2.39	3202	2.39	0
<b>Vegetación Secundaria</b>	54339	40.50	54363	40.51	54363	40.51	24
<b>Zona Urbana</b>	25	0.02	25	0.02	25	0.02	0

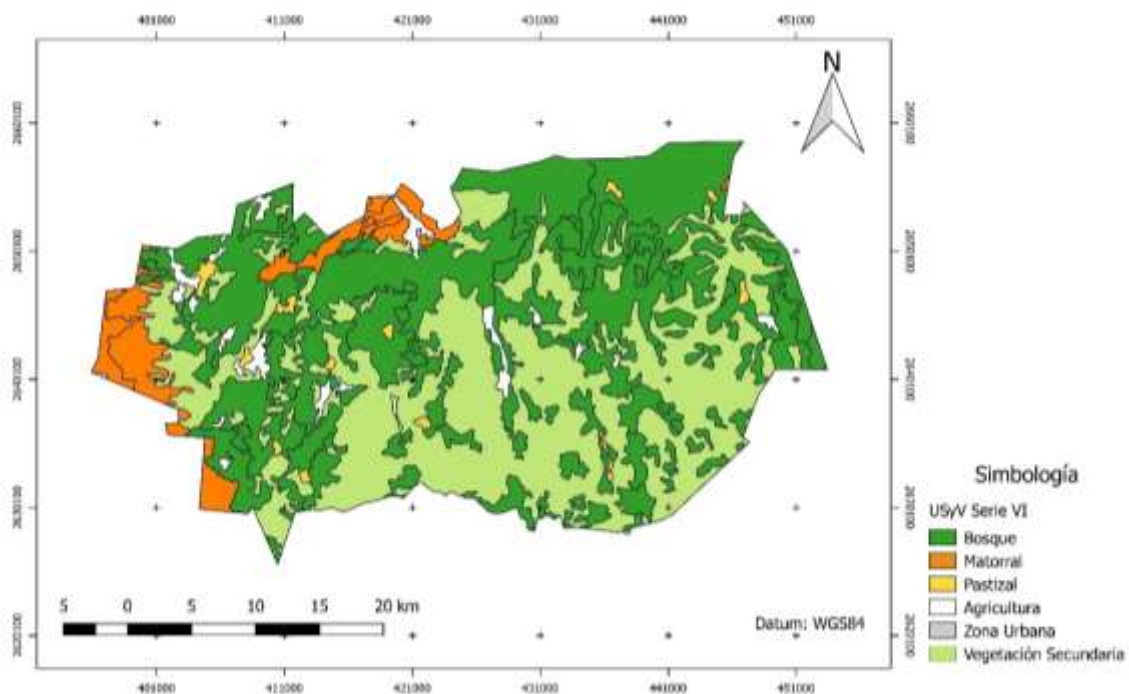


En las Figuras 26 y 27 se muestran los mapas de uso de suelo y vegetación de las series IV y VI, se puede observar que no hay cambios tan visibles respecto a las dos series. Las áreas boscosas agrupan los siguientes tipos de vegetación: bosque de juniperus, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de encino y bosque de encino pino; las cuales han disminuido su superficie 43 ha, 26 ha corresponden a bosque de pino y 17 ha a bosque de encino-pino. Las áreas de matorrales agrupan los siguientes tipos: matorral desértico micrófilo, matorral desértico rosetófilo, mezquital xerófilo y matorral submontano.

Las áreas agrícolas agrupan dos tipos: la agricultura de riego anual y la de temporada anual; las áreas de pastizal se clasifican como pastizales inducidos los cuales han aumentado 25 ha. Las áreas clasificadas como vegetación secundaria corresponden a los tipos: vegetación secundaria de bosque de pino encino y vegetación secundaria de bosque de encino los cuales se denominan chaparrales que han aumentado 24 ha. El cambio de uso de suelo, de forestal a urbano o agrícola y ganadero, es una de las principales prácticas por las que se provocan los incendios; ya que este se produce generalmente sin ninguna precaución y conduce a cambios irreversibles en el ecosistema (INECC, 2007).



**Figura 26.** Mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie IV.



**Figura 27.** Mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie VI.

## 8.0 CONCLUSIONES

El estudio comprueba que los datos obtenidos por teledetección permiten estimar las emisiones de gases efecto invernadero producidas por la quema de biomasa, al utilizar los índices espectrales: NBR y NDVI los cuales miden las diferencias entre la reflectividad de las bandas multispectrales.

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el gas de efecto invernadero que más aporta a los incendios forestales, seguido por el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), y el que menos emite son los óxidos nitrosos ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Las emisiones están asociadas directamente con el número e intensidad de los incendios forestales; el total de emisiones para el periodo fue de 290,132.83 Mg siendo el año de 2011 el que presentó mayores emisiones, el tipo de vegetación que más se afectó fue bosque de encino-pino, seguida por bosques de encino lo cual generó cambio de uso de suelo; aceptamos la hipótesis ya que existen diferencias en la cantidad de las emisiones en relación con los tipos de cobertura vegetal afectados.

Los mayores cambios en los usos de suelo y vegetación se aprecian en la serie VI respecto a la serie IV, se puede observar como las áreas de pastizales aumentan en 0.02%, la zona urbana, las áreas agrícolas y los matorrales han mantenido sus superficies; sin embargo, las áreas boscosas han disminuido en un 0.03% generando así que aumenten las áreas de vegetación secundaria con un 0.01%. El aumento de las áreas de pastizales ha generado la disminución de las áreas boscosas del municipio, lo cual se justifica con los resultados para las clases de coberturas en el año de 2013 pues la clase baja y media aumentan y la clase alta disminuye.

Los resultados en este trabajo ponen en manifiesto la relevancia de los incendios forestales como una fuente de emisión de gases de efecto invernadero y una posible incidencia de estos en la dinámica del cambio climático comparable a la que pueden tener otras fuentes de emisión que han sido consideradas en los

inventarios nacionales de GEI y sobre las que se centran los acuerdos en el Protocolo de Kioto para la reducción de las emisiones procedentes de las actividades humanas.

Los incendios son fenómenos naturales y necesarios en los ecosistemas, sin embargo, su ocurrencia, intensidad y duración en las últimas décadas es debido a la acción humana, por lo cual podemos considerar a las zonas forestales como focos potenciales de emisiones de GEI, en primera instancia por la combustión de la biomasa y en segunda por la pérdida de la capacidad de fijación de CO<sub>2</sub>.

La aplicación de las tecnologías de percepción remota nos permite obtener buenos resultados sobre el monitoreo, reporte y verificación de incendios forestales para evitar la degradación, cambio de uso de suelo, preservar los ecosistemas forestales y reducir las emisiones de gases efecto invernadero.

Para poder hacer comparaciones a nivel nacional en los diferentes tipos de vegetación, es importante homogeneizar metodologías y unidades de medición, así como también los factores de consumo específicos para cada región.

## 9.0 LITERATURA CITADA

- Arno, S.F.1980. Forestl fire history of the northern Rockis. Journal of Forestry 39:726-729.
- Bocco, G., M. Mendoza y O. Masera. 2001. La dinámica del cambio de uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Boletín del Instituto de Geografía. 44: 18-38.
- Bueno-Hurtado, P., A. López-Santos, I. Sánchez-Cohen, M. A. Velásquez-Valle y J. L. González-Barrios. 2015. Cambios de uso de suelo y sus efectos sobre la dinámica de GEI en el estado de Durango, México. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. VI (4): 75-84
- Bulnes, A. Estefania, Cruz.N Xochitl , Villers.R, Lourdes. (2017) Emisiones de CO2 por incendios forestales en la ciudad de México de 2003 a 2014. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Céspedes-Flores S.E y E. Moreno-Sánchez. 2010. Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación en las entidades federativas de México. Investigación ambiental 2010. 2 (2): 5-13.
- Chandler, C.P. Cheney, P. Thomas,L. Trabaud, D.Williams .1983. Fire in forestry. Volume 1: Forest fire behavior and effects. Johon Wiley y Sons. New York, USA.450p.
- Chávez. N, Julián. (2015). Incendios forestales y cambio climático. Estimación de emisiones en los incendios de Andilla y Cortes de Pallás.
- Cochrane, M. A. and K. C. Ryan. 2009. Fire and fire ecology: Concepts and principles, in Tropical Fire Ecology: Climate Change, Land Use, and Ecosystem Dynamics, edited by M. A. Cochrane, pp. 25–62, Springer-Praxis, Chichester, U. K.
- CONAFOR, 2012. Comisión Nacional Forestal [www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx)
- CONAFOR, 2018. Comisión Nacional Forestal [www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx)
- De Jong, B., M. Olguín, F. Rojas, V. Maldonado, F. Paz, J. Etchevers, C. O. Cruz y J. A. Argumedo. 2009. Inventario nacional de emisiones de gases invernadero 1990-2006. Actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2006 en la Categoría de Agricultura, Silvicultura y otros usos de la tierra. Reporte preparado para el Instituto Nacional de Ecología. México, D. F

De Jong, B., Rojas, F., Olguín, M., de la Cruz, V., Paz, F., Jiménez, G., & Castillo, M. A. (2010). Establecimiento de una línea base de las emisiones actuales y futuras de Gases de Efecto Invernadero provenientes de Agricultura, Silvicultura y otros usos del suelo. Chiapas, México.

FAO. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015.

FAOSTAT (The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database). 2014. <http://faostat3.fao.org/home/E>. 2014. (Consulta: Marzo,27, 2019).

Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz & R. Van Dorland (2008): Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, S. Solomon et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK,

Freitas S.R., K.M. Longo, M.A.F., Silva Dias, P.L. Silva Dias, R. Chatfield, E. Prins, P. Artaxo, G. Grell, F. S. Recuero. 2005. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. Environmental Fluid Mechanics 5: 135-167

García, D., & Esmeralda, E. R. (2015). Construcción de mapas de combustible forestal para detectar el peligro de incendio en un bosque de pino-encino (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

García, E. 1981. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana. UNAM. México. 252 pp.

Gilman, J. B., B. M. Lerner, W. C. Kuster, P. D. Goldan, C. Warneke, P. R. Veres, J. M. Roberts, J. A. de Gouw, I. R. Burling, and R. J. Yokelson. 2015. Biomass burning emissions and potential air quality impacts of volatile organic compounds and other trace gases from fuels common in the U.S. Atmospheric Chemistry and Physics 15: 1391513938

Guo, F., Y. Ju, G. Wang, E. C. Alvarado, X. Yang, Y. Ma, A. Liu. 2018. Inorganic chemical composition of PM<sub>2.5</sub> emissions from the combustion of six main tree species in subtropical China. Atmospheric Environment 189: 107–115.

Holder, A. L., G. S. W. Hagler, J. Aurell, M. D. Hays, and B. K. Gullett. 2016. Particulate matter and black carbon optical properties and emission factors from prescribed fires in the southeastern United States, J. Geophys. Res. Atmos., 121: 3465–3483

- ICONA. 1993. Manual de Operaciones contra Incendios Forestales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. España. 147 p.
- INE, 2005. Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F
- INECC. 2007. Recursos forestales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.  
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/312/bosquespres.html>  
(Consulta: agosto 15, 2020).
- INEGI. 1986. Síntesis geográfica del Estado de Nuevo León. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. Nuevo León, México.
- INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. General Zaragoza, Nuevo León, México.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2015. Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC/SEMARNAT, México
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of the WG I to the AR4 of the IPCC, 2007
- IUSS Working Group WRB, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.
- Johnston, F. H., S. B. Henderson, Y. Chen, J. T. Randerson, M. Marlier, R. S. DeFries, P. Kinney, D. M. Bowman, M. Brauer. 2012. Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. Environmental Health Perspectives. 120(5): 695-701
- Key, C. H., Benson, N. C. 1999. Measuring and remote sensing of burn severity. In Proceedings Joint Fire Science Conference and Workshop, II, 15-17.
- Larkin, N. K., S. M. Raffuse and T. M. Strand. 2014. Wildland fire emissions, carbon, and climate: U.S. emissions inventories. Forest Ecology and Management 317: 61–69.

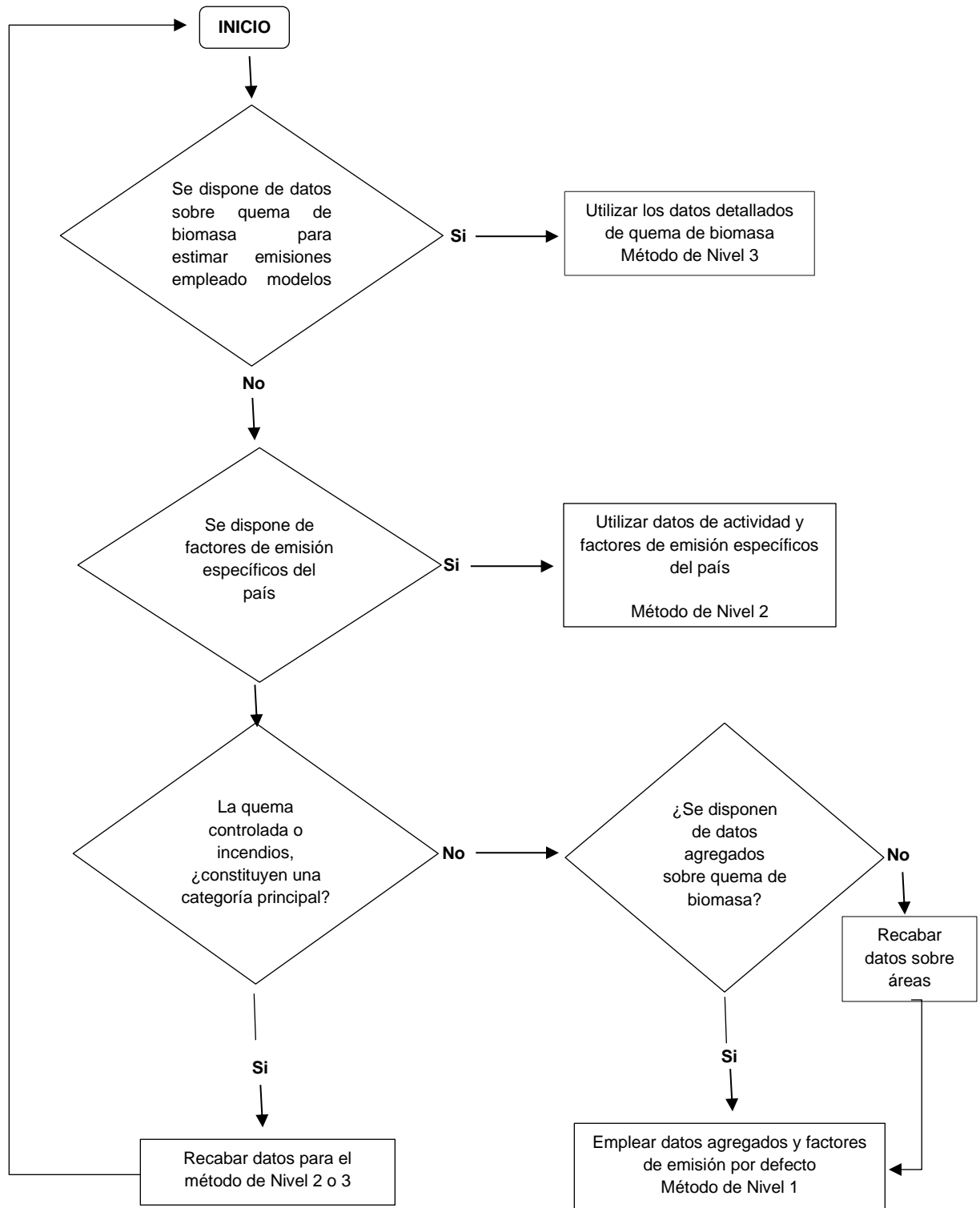
- López Martínez, J. I. (2015). Procesos de recuperación de la vegetación y suelo en áreas incendiadas de la Sierra Madre Oriental (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Malchus, B.B. Jr. 1998. Hydrologic and water quality effects of fire. Effects of fire in Management of Southwestern Natural Resources . Tucson, Arizona. USA.pp 31-42.
- Merla Rodríguez, G. (1990). Nuevo León: geografía regional.
- Miller, M. 2000. Fire autecology. In: Brown, J. K., Smith, J. K. (Eds.). Wildland fire in ecosystems. Effects of fire on flora. USDA Forest Service. General Technical Report RMRS-GTR-42. Vol. 2. Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, Colorado. 257 p.
- Morales, H. A; Navar, J, Dominguez, P.A.2000. The effect of prescribed burning on Surface runoff in a pine forest. For ecol. Manage. Vol.137:199-207.
- Mota, B. and M. J. Wooster. 2018. A new top-down approach for directly estimating biomass burning emissions and fuel consumption rates and totals from geostationary satellite fire radiative power (FRP). Remote Sensing of Environment 206: 45-62.
- Ottmar, R. D. 2014. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Modeling fuel consumption. Forest Ecology and Management 317: 41–50.
- Ressl, R.el.Cruz, 2012. Detección y monitoreo de incendios forestales mediante imágenes de satélite. CONABIO.Biodiversitas,100:12-13.
- Robinson, J. G., Bodmer, R. E. 1999. Toward wildfire management in tropical forests. Wildfire Manage, 63, 1-13. <https://doi.org/10.2307/3802482>
- Rodríguez, T, D.A, Rodrigues M, Fernandez, F. Pyne, S.2002. Educación e incendios forestales. 2ª ed. MundiPrensa.Mexico, D.F.201p.
- Rzedowski, J., & Huerta, L. (1994). vegetación de México (No. 582.16 R997r Ej. 1 002135). Limusa, Noriega Editores.
- Sandberg, D.V.; Ottmar, R.; Peterson, J. y Core, J. Wildland fire on ecosystems: effects of fire on air. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2002. 5, 79 p.
- Saynes-Santillán, V., J. D. Etchevers Barra, F. Paz Pellat y L. O. Alvarado Cárdenas. 2016. Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. Terra Latinoamericana 34: 83-96.
- SEMARNAT,2000. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)
- SNIGF,2019. Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal <https://snigf.cnf.gob.mx/incendios-forestales/>



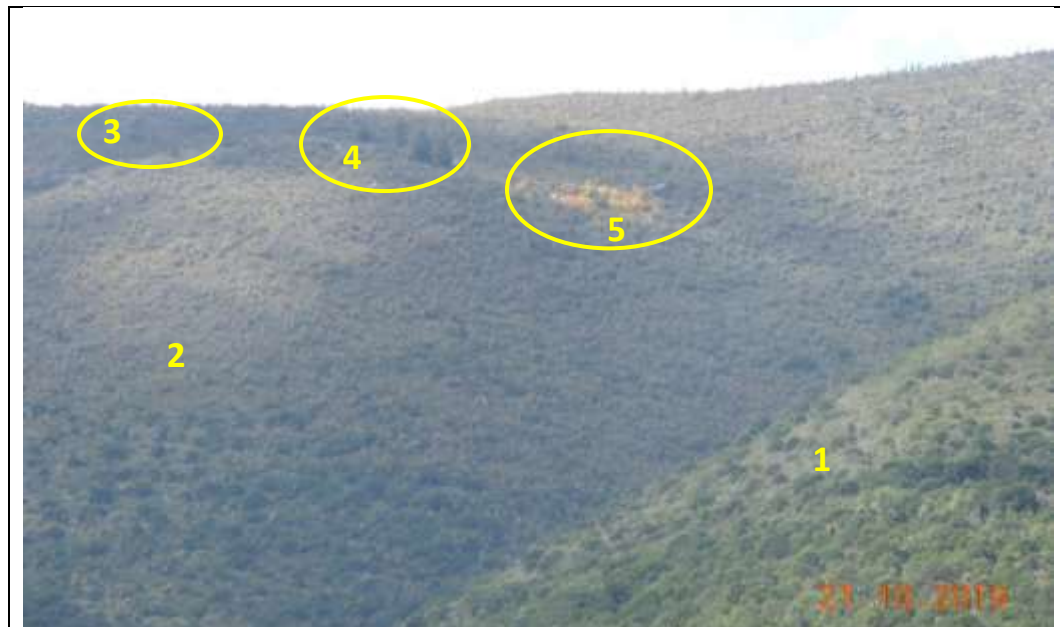
- Urbanski, S. 2014. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Emission factors. *Forest Ecology and Management* 317: 51–60
- Urquiza, R. M. N., Fernández, M. A., Pino, A. A. M. y Herrero, E. G. 2004. El fuego: uso e impacto en la esfera forestal. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*, 4(7), 8.
- Valero, E., J. Picos y M. Herrera. 2006. Cálculo de las Emisiones de CO<sub>2</sub> por los Incendios de 2006 en la Provincia de Pontevedra (Galicia). *Wildfire* 2007. pp. 1-6.
- Wan, J., X. Fengming, Z. Liu, L. Bing, A. Alsaedi, T. Hayat, B. Ahmad and D. Guan. 2018. The spatiotemporal features of greenhouse gases emissions from biomass burning in China from 2000 to 2012. *Journal of Cleaner Production* 181: 801-808.
- Wright, H. A. and Bailey, A. W. 1982. *Fire ecology United States and southern Canadá*. New York: John Wiley & Sons. 501 p.
- Xu, B. 2013. Modis-based remote-sensing monitoring of the spatiotemporal patterns of China's grassland vegetation growth. *International Journal of Remote Sensing*, 34(11), pp. 3867-3878.
- Yadav, I. S., N. L. Devi, J. Li, J. Hussain Syed, G. Zhang and H. Watanabe. 2017. Biomass burning in Indo-China peninsula and its impacts on regional air quality and global climate change-a review. *Environmental Pollution* 227: 414-427.
- Yamallel, Y., Israel, J., Jiménez Pérez, J., Alanís Rodríguez, E., Aguirre Calderón, Ó. A., González Tagle, M. A., & Treviño Garza, E. J. (2013). Emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de incendios forestales de 2000-2011 en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. *Ciencia UANL*, 16(62), 68-75.

## 10.0 ANEXOS

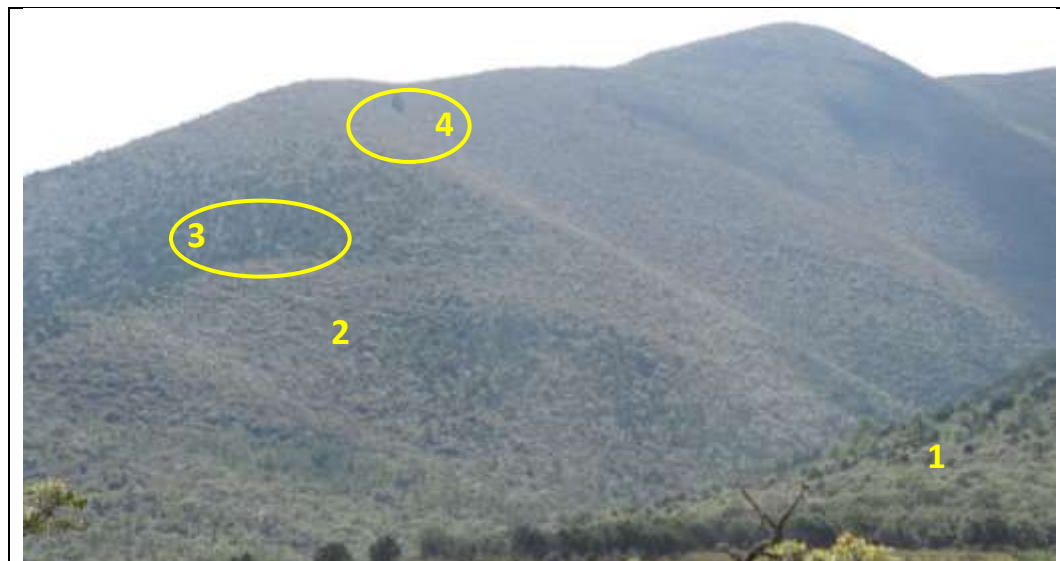
Árbol de decisiones para la identificación del nivel apropiado para estimar las emisiones de gases efecto invernadero provocadas por incendios forestales.



### 10.1 Verificación de las Áreas Incendiadas del Ejido “Tepozanes”



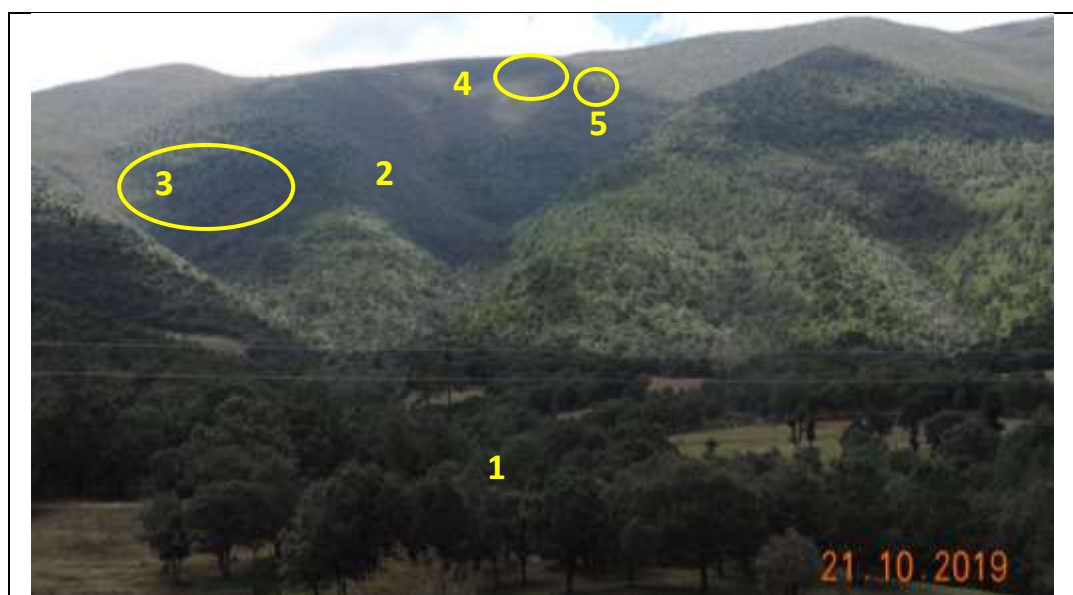
Áreas incendiadas: 1) Bosque de Encino, 2) Vegetación Secundaria de Bosque de Encino, 3) Bosque de Encino- Pino, 4) *Pseudotsuga menziesii* 5) *Populus tremuloides*.



Áreas incendiadas: 1) Bosque de Encino, 2) Vegetación Secundaria de Bosque de Encino, 3) Bosque de Encino- Pino, 4) *Pseudotsuga menziesii*.



Áreas incendiadas: 1) *Pseudotsuga menziesii*, 2) Vegetación Secundaria de Bosque de Encino, 3) Bosque de Encino.



Áreas incendiadas: 1) Bosque de Encino, 2) Vegetación Secundaria de Bosque de Encino, 3) Bosque de Encino- Pino, 4) *Pseudotsuga menziesii* 5) *Populus tremuloides*.